



Vývoj zařízení ke stanovení odvozeného cetanového čísla paliv

Disertační práce

Studijní program: P2302 – Stroje a zařízení
Studijní obor: 2302V010 – Konstrukce strojů a zařízení
Autor práce: **Ing. Radek Holubec**
Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Laurin, CSc.





Development of Apparatus for Determination of Derived Cetane Number of Fuels

Dissertation

Study programme: P2302 – Machines and Equipment
Study branch: 2302V010 – Machine and Equipment Design
Author: **Ing. Radek Holubec**
Supervisor: doc. Ing. Josef Laurin, CSc.



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé disertační práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

ABSTRAKT

Práce se zabývá vývojem, stavbou a kalibrací zkušebního zařízení ke stanovení odvozeného cetanového čísla paliv pro vznětové motory. Ke stanovení OCČ se využívá dobré korelace průtahu vznícení a vznětlivosti paliva vstříknutého do ohřátého stlačeného vzduchu. Na rozdíl od obdobných zařízení založených na měření pouze jedné veličiny (průtahu vznícení) využívá zařízení vyvinuté na KVM za účelem zpřesnění stanovení OCČ hodnotu teploty náplně a gradient teploty stěny komory. Další zdokonalení spočívá v použití moderního palivového systému (common rail), který umožňuje vytvořit podmínky vstřiku podobné podmínkám u moderních vznětových motorů.

ABSTRACT

The dissertation focuses on a development, construction and calibration of the apparatus for the determination of derived cetane number of fuels for diesel engines. The determination is based on a good correlation between ignition delay and self ignition of fuel injected into a combustion chamber filled with compressed air heated to suitable pre-determined temperature. In contrast to the comparable devices which use for the determination DCN only one variable (ignition delay) uses the apparatus developed at the Department of Vehicles and Engines at the Technical University of Liberec in order to more precise the determination other variables like the charge temperature and the temperature gradient of the chamber wall. The fuel is injected using a Common Rail injection system which is used in the modern diesel engines.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval především svému školiteli doc. Ing. Josefu Laurinovi, CSc. za jeho cenné rady a připomínky k práci. Dále bych rád poděkoval bývalému kolegovi Ing. Petru Starému za pomoc při výrobě zařízení, zaměstnanci firmy BOSCH Jihlava Ing. Jaroslavu Čápovi Ph.D. za poskytnutí komponentů palivového systému a potřebných rad k jeho použití, Ing. Tomáši Zvolskému, který navrhl a vyrobil elektronický systém řízení a sběru dat a byl ochotný tento systém na požádání upravit, i po úspěšném obhájení vlastní diplomové práce. .

OBSAH

| | | |
|------------|--|-----------|
| A | Seznam obrázků..... | 9 |
| B | Seznam tabulek..... | 11 |
| C | Seznam POUŽITÝCH zkratk A OZNAČENÍ | 12 |
| 1 | Úvod | 13 |
| 2 | Cíle práce..... | 15 |
| 3 | Současný stav | 16 |
| 3.1 | Definice CČ..... | 16 |
| 3.2 | Stupnice vznětlivosti paliv a vybraná referenční paliva | 16 |
| 3.2.1 | Cetenová stupnice vznětlivosti paliv | 16 |
| 3.2.2 | Cetanová stupnice vznětlivosti paliv | 16 |
| 3.2.3 | Referenční paliva..... | 17 |
| 3.3 | Metody zjišťování hodnoty CČ..... | 17 |
| 3.3.1 | Motorová metoda..... | 17 |
| 3.3.2 | Laboratorní metoda stanovení cetanového indexu..... | 21 |
| 3.3.3 | Metody založené na měření průtahu vznícení..... | 21 |
| 4 | Fyzikální a chemické procesy spalování heterogenní směsi..... | 26 |
| 4.1 | Průtah vznícení heterogenní směsi | 26 |
| 4.2 | Vliv chemického složení a přísad..... | 28 |
| 4.2.1 | Vliv chemické struktury paliva..... | 29 |
| 4.2.2 | Vliv koncentrace kyslíku ve vzduchu na průtah vznícení..... | 29 |
| 5 | Vývoj a stavba zkušebního zařízení | 30 |
| 5.1 | Celkové schéma..... | 30 |
| 5.2 | Vysokotlaká spalovací komora | 31 |
| 5.2.1 | Konstrukce vstupního čela komory..... | 33 |
| 5.2.2 | Výpočet maximálního tlaku v komoře | 34 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 5.3 | Topení..... | 38 |
| 5.3.1 | Určení přestupu tepla vnější válcovou izolací..... | 39 |
| 5.3.2 | Vedení tepla chlazenými čely komory | 39 |
| 5.3.3 | Odhad doby ohřevu | 40 |
| 5.3.4 | Poškození (přehřátí) topných těles | 41 |
| 5.4 | Palivový systém..... | 41 |
| 5.4.1 | Výměna paliva | 46 |
| 5.4.2 | Návrh inovace palivového systému | 48 |
| 5.5 | Chladicí systém | 48 |
| 5.6 | Vzduchový systém | 49 |
| 5.7 | Systém řízení a sběru dat | 50 |
| 5.7.1 | Základní Parametry řídicí jednotky [35] | 51 |
| 5.7.2 | Použité snímače | 53 |
| 5.8 | Software..... | 54 |
| 5.8.1 | Program mikrokontroléru [35] | 54 |
| 5.8.2 | Program pro počítač [35] | 55 |
| 6 | Experimentální část práce..... | 57 |
| 6.1 | Zpracování získaného průběhu tlaku | 57 |
| 6.1.1 | Filtrace | 57 |
| 6.1.2 | Konfrontace naměřeného průběhu tlaku s modelem vytvořeným v programu Fluent .. | 59 |
| 6.2 | Vyšetřování průběhu vstřiku paliva a průběhu hoření vysokorychlostní kamerou..... | 61 |
| 6.2.1 | Popis experimentu | 61 |
| 7 | Tvorba prediktivního modelu | 67 |
| 7.1 | Popis problematiky..... | 67 |
| 7.2 | Návrh modelu | 67 |
| 7.3 | Předzpracování dat..... | 71 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 7.3.1 | Vyloučení odlehlých hodnot ze souboru dat | 72 |
| 7.3.2 | Návrhy zlepšení zařízení: | 79 |
| 8 | Porovnání se zkušebními zařízeními na trhu..... | 80 |
| 8.1 | Výpočet opakovatelnosti měření na zařízení | 81 |
| 8.2 | Porovnání naměřených průběhů tlaku v komoře na zařízení CID 510 a zařízení vyvinutého na TUL..... | 84 |
| 9 | Závěr | 86 |
| | Literatura | 88 |
| | Firemní literatura | 91 |
| | Vlastní publikace autora | 92 |
| | Příloha 1 (Makro k získání parametrů A až F)..... | 94 |
| | Příloha 2 („Hlavní“ záložka a záložka „Nastavení“ programu pro počítač) | 95 |
| | Příloha 3: Tabulka směšovacích poměrů sekundárních referenčních paliv „T-24“ a „U-17“ | 96 |
| | Příloha 4/Strana 1: Postup měření [3] | 97 |
| | Příloha 4/Strana 2: Postup měření [3] | 98 |
| | Příloha 4/Strana 3: Postup měření [3] | 99 |
| | Příloha 4/Strana 4: Postup měření [3] | 100 |
| | Příloha 4/Strana 5: Postup měření [3] | 101 |
| | Příloha 4/Strana 6: Postup měření [3] | 102 |
| | Příloha 4/Strana 7: Postup měření [3] | 103 |
| | Příloha 4/Strana 8: Postup měření [3] | 104 |
| | Příloha 4/Strana 9: Postup měření [3] | 105 |
| | Příloha 4/Strana 10: Postup měření [3] | 106 |

A SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obrázek 1: Přehled primárních referenčních paliv a jejich chemických struktur | 17 |
| Obrázek 2: Pořadí měření vzorku a referenčních paliv | 18 |
| Obrázek 3: Jednoválcový zkušební motor firmy Waukesha Motor (model CFR F5)[46]..... | 19 |
| Obrázek 4: Hlavní komponenty motoru CFR F5 (zleva: hlava válců, kliková skříň, palivový systém) [46]..... | 20 |
| Obrázek 5: FIT se zobrazením hlavních komponent zařízení [45]..... | 22 |
| Obrázek 6: Hlavní část zařízení IQT [41] | 23 |
| Obrázek 7: Schéma zařízení IQT [34]..... | 23 |
| Obrázek 8: Zařízení společnosti PAC – CID 510 [43]..... | 25 |
| Obrázek 9: Jednotlivé části průtahu vznícení..... | 26 |
| Obrázek 10: Zjišťování podílu fyzikální a chemické části na celkové době průtahu vznícení porovnáním vstřiku paliva do vzduchu a do dusíku. [34] | 28 |
| Obrázek 11: Chemická struktura cetanu | 29 |
| Obrázek 12: Chemická struktura alfa-metylnaftalenu | 29 |
| Obrázek 13: Celkové schéma zařízení | 30 |
| Obrázek 14: Hlavní části komory. | 32 |
| Obrázek 15: Ilustrativní řez komory..... | 33 |
| Obrázek 16: Proměnlivý průřez vstupního čela komory..... | 34 |
| Obrázek 17: Model pro výpočet průběhu teploty a tlaku v komoře (Matlab Simulink). | 35 |
| Obrázek 18: Nezaizolovaná vysokoteplotní komora osazena topnými tělesy..... | 39 |
| Obrázek 19: Teplota chlazeného vstupního čela a hustota tepelného toku..... | 40 |
| Obrázek 20: Schéma vysokotlaké části palivového systému. [13]..... | 42 |
| Obrázek 21: Řez vysokotlakým regulátorem (DRV). [13]..... | 43 |
| Obrázek 22: Snímač tlaku paliva umístěný na railu. A) Schematické znázornění konstrukce snímače, B) fotografie zvětšeného odporového můstku [13]..... | 44 |
| Obrázek 23: Vstřikovač s elektromagnetickým řídicím prvkem pro motory s čtyřventilovou technikou..... | 44 |
| Obrázek 24: Schéma palivového systému. | 48 |
| Obrázek 25: Schéma chladicího okruhu. | 49 |
| Obrázek 26: Schéma vzduchového systému. | 49 |
| Obrázek 27: Elektronická řídicí jednotka [35]..... | 51 |
| Obrázek 28: Panel ručního ovládání ventilů. [35]..... | 52 |
| Obrázek 29: Celkové zapojení řídicí jednotky včetně snímačů a ovládaných prvků. [35]..... | 54 |
| Obrázek 30: Příklad naměřeného průběhu tlaku..... | 58 |

| | |
|--|-----------|
| <i>Obrázek 31: Detail naměřeného průběhu tlaku.....</i> | <i>58</i> |
| <i>Obrázek 32: Průběh vypočteného tlaku v programu Fluent. [15].....</i> | <i>60</i> |
| <i>Obrázek 33: Měření s vysokorychlostní kamerou namířenou na safírové okénko v čele komory.</i> | <i>62</i> |
| <i>Obrázek 34: Schematické znázornění pořizování dvou videí vysokorychlostní kamerou (vlevo záznam vstřiku do atmosféry, vpravo záznam průběhu hoření v komoře).....</i> | <i>62</i> |
| <i>Obrázek 35: Kompilace nejzajímavějších snímků z 1. a 2. videa, zachycující průběh vstřiku paliva a světelné záření hořící směsi.</i> | <i>64</i> |
| <i>Obrázek 36: Nejzajímavější políčka videa pořízeného při vstřiku do atmosféry.</i> | <i>65</i> |
| <i>Obrázek 37: Příklad naměřeného průběhu tlaku v zařízení CID 510. [43].....</i> | <i>84</i> |

B SEZNAM TABULEK

| | |
|---|-----------|
| <i>Tabulka 1: Koeficienty pro výpočet c_v směsi nafty se vzduchem a spalín.....</i> | <i>35</i> |
| <i>Tabulka 2: Kritické hodnoty Grubbsových testů.....</i> | <i>74</i> |
| <i>Tabulka 3: Stanovené hodnoty OCČ před odstraněním odlehlých hodnot.....</i> | <i>75</i> |
| <i>Tabulka 4: Vypočtené hodnoty CČ po odstranění odlehlých hodnot a hodnot zařazených do „zahřívací“ procedury.....</i> | <i>76</i> |
| <i>Tabulka (5): Porovnání technických parametrů různých zařízení.....</i> | <i>80</i> |
| <i>Tabulka 6: Přehled výsledků získaných při ověřování opakovatelnosti měření. [3].....</i> | <i>81</i> |
| <i>Tabulka 7: Výsledky měření OCČ získané ze zdrojových dat obsažených v literatuře [3].....</i> | <i>82</i> |
| <i>Tabulka 8: Porovnání opakovatelnosti a reprodukovatelnosti vybraných metod. [43].....</i> | <i>83</i> |

C SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A OZNAČENÍ

| Zkratka | Význam |
|----------------|---|
| °KH | sputupně otočení klikového hřídele |
| 2-EHN | 2 - Etylhexyl nitrát |
| A/D | Analogově - Digitální |
| AET | Advanced Engineering Technology |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| bar | Jednotka tlaku (10^5 Pa) |
| BP | Bakalářská Práce |
| c | Měrná tepelná kapacita [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$] |
| CČ | Cetanové Číslo |
| CFPP | Cold Filter Plugging Point (teplota vylučování parafinů) |
| CI | Cetanový Index |
| CN | Cetane Number |
| CO | Oxid uhelnatý |
| CR | Common Rail |
| c_v | Měrná tepelná kapacita izochorická [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$] |
| CVCC | Constant Volume Combustion Chamber |
| DCN | Derived Cetane Number |
| DP | Diplomová Práce |
| DRV | Druckregelventil |
| EEPROM | Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory |
| EGR | Exhaust Gas Recirculation |
| FFT | Fast Fourier Transform |
| FIT | Fuel Ignition Tester |
| IQT | Ignition Quality Tester |
| JTAG | Joint Test Action Group |
| KVM | Katedra Vozidel a Motorů |
| m | Parametr Wiebeho charakteristické rovnice [-] |
| OCČ | Odvozené Cetanové Číslo |
| P | Výkon [W] |
| ppm | 1 miliontina (parts per million) |
| PSM | pístový spalovací motor |
| PTFE | Polytetrafluoroethylen |
| PWM | Pulsně šířková modulace) Pulse Width Modulation |
| r | opakovatelnost (repeatability) |
| R | reprodukovatelnost (reproducibility) |
| r_{vzd} | individuální plynová konstanta vzduchu [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$] |
| T | Termodynamická teplota [K] |
| TUL | Technická univerzita v Liberci |
| VVCC | Variable Volume Combustion Chamber |
| α | hladina spolehlivosti [-] |
| κ | Poissonova konstanta [-] |
| λ | součinitel přebytku vzduchu (Lambda) |

1 ÚVOD

Cetanové číslo (CČ) udávající vznětlivost motorového paliva se již od třicátých let minulého století zjišťuje na zkušebním jednoválcovém motoru. Jiný způsob zjišťování CČ vychází z doby měření průtahu vznícení paliva vstříknutého do spalovací komory naplněné ohřátým stlačeným vzduchem.

Poslední dobou se situace na trhu s palivy rychle mění a konkurenční distribuční společnosti ve snaze zlepšit kvalitativní vlastnosti motorové nafty tyto nafty aditivují, čímž mění jejich vlastnosti, jako je filtrovatelnost (CFPP), pěnovitost, antikorozi a mazací vlastnosti a vznětlivost. U paliv pro zážehové motory je aditivace benzínu také samozřejmostí, avšak s jedním rozdílem. Motorista si může na základě doporučení výrobce svého automobilu vybrat benzin s oktanovým číslem od 91 do více než 100 jednotek. Hodnota oktanového čísla je vždy vyznačena na výdejném stojanu. Majitelé automobilů se vznětovým motorem se musejí spolehnout pouze na to, že čerpaná nafta nesmí mít podle normy ČSN EN 590 nižší hodnotu než 51 CČ. Skutečná hodnota CČ se na českém trhu pohybuje nejčastěji v rozmezí od 51 do 57, ale v sousedních zemích, jako je Německo, Rakousko a Polsko, je možné natankovat i naftu s vyšší vznětlivostí než 63 CČ. K tomu, aby se konečný spotřebitel zorientoval v nabídce nafty u čerpacích stanic, se nestačí spolehnout na zvukná jména některých prodejců. Jak vyplývá z měření v laboratořích SGS Czech Republic, například motorová nafta s označením Shell V-Power Diesel se v ČR prodávala s 52 CČ, tedy těsně nad zákonnou normou stanovenou hranicí, zatímco v Německu se ve stejné době nafta se stejným označením prodávala s hodnotou okolo 59 CČ. Důvodem tohoto rozdílu zřejmě nebude nic jiného než vysoká cena aditiv zvyšujících hodnotu CČ. Konečný zákazník může sám zvýšit vznětlivost paliva přidáním těchto zvyšovačů CČ např. 2-ethylhexyl nitrátu (dále jen 2-EHN) těsně před tankováním.

Antikorozi a mazací vlastnosti přímo souvisejí s životností palivového systému a jejich mezní hodnoty jsou dány normou. Filtrovatelnost souvisí s teplotou nafty, při které je ještě možné vozidlo provozovat, a pěnovitost má vliv hlavně na rychlost tankování. Vznětlivost motorové nafty vyjádřená cetanovým číslem má podle mnohých studií vliv na výkonové parametry, spotřebu, kultivovanost chodu, startovatelnost za studena. Zvyšování cetanového čísla také koreluje se snižováním emisí spalovacích motorů jako CO, HC, NO_x a redukcí bílého kouře [2].

Aby byly současné snahy o snižování emisí produkovaných pístovými spalovacími motory úspěšné, je zapotřebí vedle značných investic do vývoje motorů využít i potenciálu změny kvalitativních parametrů paliv, z nichž je velmi důležitým parametrem právě hodnota

cetanového čísla.

Na katedře vozidel a motorů (dále jen KVM), kde se často měří výkonové a emisní parametry vznětových motorů provozovaných na motorovou naftu i alternativní paliva, vyvstal požadavek určovat hodnotu CČ paliv. Protože zjištění hodnoty CČ jednoho vzorku v laboratořích SGS stojí okolo 5 tis. Kč a pořízení měřicího zařízení je otázkou několika milionů Kč, bylo na katedře vyvíjeno zařízení ke stanovení hodnoty CČ, respektive OCČ. Vývoj tohoto zařízení, jeho realizace, testování a určení způsobu výpočtu OCČ byly hlavními úkoly této práce.

2 CÍLE PRÁCE

Cílem disertační práce je vývoj a stavba měřicího zařízení k stanovení hodnoty OCČ paliv pro vznětové motory, které bude vyhodnocovat hodnotu OCČ pomocí více měřených veličin než jen hodnoty průtahu vznícení, jak je tomu u současných měřicích zařízení se spalovací komorou konstantního objemu. V souvislosti s tímto bude potřeba stanovit závislost mezi měřenými veličinami a hodnotou OCČ. Výsledkem bude vytvoření vhodného prediktivního modelu, který bude schopen naměřeným hodnotám vybraných veličin přiřadit hodnotu OCČ. Při tvorbě vhodného prediktivního modelu bude potřeba vycházet ze sady kvalitních "trénovacích" dat, kterou je možné získat měřením paliv se známou hodnotou OCČ, tj. kalibrací.

Cíle práce se dají shrnout do několika bodů:

- přehled současných metod určování CČ respektive OCČ paliv,
- návrh zdokonalené metodiky měření OCČ,
- realizace vlastního zkušebního zařízení včetně jeho kalibrace,
- nalezení nejvhodnějších podmínek měření,
- tvorba prediktivního modelu, přiřazujícího naměřeným datům hodnotu OCČ,
- porovnání vyvinutého zkušebního zařízení se současnými metodami měření CČ ,respektive OCČ.

3 SOUČASNÝ STAV

3.1 Definice CČ

„Cetanové číslo je veličina označovaná zkratkou CČ nebo CN, udávající kvalitu motorové nafty z hlediska její vznětové charakteristiky. Udává množství n-hexadekanu (cetanu) v objemových procentech ve směsi s aromatickým uhlovodíkem 1-methylnaftalenem, která má stejnou vznětovou charakteristiku jako srovnávaný vzorek skutečné pohonné látky (nafty). Cetanové číslo 0 tedy odpovídá motorové naftě, která má stejné charakteristiky jako čistý metylnaftalen; cetanové číslo 100 odpovídá čistému cetanu (hexadekanu).“ [32]

3.2 Stupnice vznětlivosti paliv a vybraná referenční paliva

3.2.1 Cetenová stupnice vznětlivosti paliv

Počátky zjišťování vznětlivosti paliv sahají do třicátých let minulého století. Podobně jako v případě oktanového čísla byla použita dvě referenční uhlovodíková paliva: alfa-hexadecen (ceten) a alfa-methylnaftalen.

Takto vzniklá stupnice přiřazovala více vznětlivému referenčnímu palivu (cetenu) cetanové číslo 100 a druhému referenčnímu palivu (alfa-methylnaftalenu), které bylo o mnoho odolnější k oxidaci, cetanové číslo 0.

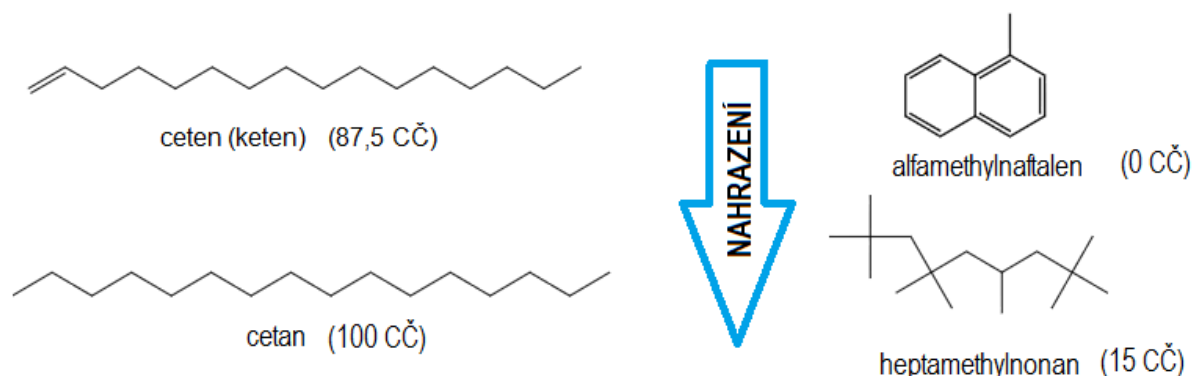
3.2.2 Cetanová stupnice vznětlivosti paliv

Na konci třicátých let se obtížně vyrobitelný ceten nahradil snadněji získatelným cetanem a tím se musel stanovit i vzájemný přepočít mezi cetenovou a cetanovou stupnicí (viz vzorec 1).

$$\text{Cetanové číslo} = 0,875 * \text{Cetenové číslo} \quad (1)$$

Změny se však dotkly i výběru druhého referenčního paliva. Kvůli problémům s manipulací a vysoké ceně byl alfa-methylnaftalen nahrazen dostupnějším heptamethylnonanem. Ten má však 15 CČ a proto byla cetanová stupnice definována následovně:

$$\text{CČ} = \text{objemová procenta cetanu} + 0,15 * \text{objemová procenta heptamethylnonanu}.$$



Obrázek 1: Přehled primárních referenčních paliv a jejich chemických struktur

3.2.3 Referenční paliva

- **Primární referenční paliva.**

Souvisí s definicí stupnice CČ a jsou jimi: Cetan (100 CČ) a heptamethylnonan (15 CČ).

- **Sekundární referenční paliva.**

Používají se převážně k běžným měřením, ale i kalibracím. Jedná se o směsi dvou paliv s velmi rozdílnou hodnotou CČ. Tato paliva jsou označována jako „T fuel“ a „U fuel“. Přičemž „T fuel“ má typicky hodnotu mezi 73 až 75 CČ a „U fuel“ mezi 20 až 22 CČ. Přesná hodnota CČ těchto paliv je stanovena až po jejich výrobě.

3.3 Metody zjišťování hodnoty CČ

3.3.1 Motorová metoda

Tato zkušební metoda je založená na porovnávání zkoumaného vzorku paliva s referenčními palivy. Testované palivo se zkouší na standardizovaném zkušebním jednoválcovém čtyřtakovém vodou chlazeném motoru s proměnným kompresním poměrem a nepřímým vstřikem paliva při konstantních otáčkách 900 ot/min. Teoreticky je možné měřit paliva v rozsahu 0 až 100 CČ, ale obvykle se testuje v rozmezí od 30 do 65 CČ. Předpokládaná hodnota CČ měřeného paliva musí být v rozmezí zvolených referenčních paliv. Pro měření paliva s očekávaným velice nízkým CČ se musí tedy použít jako referenční palivo s nižší hodnotou CČ například alfa-methylnaftalen (0 CČ), nebo heptamethylnonan (15 CČ). Naopak pro měření paliva s očekávanou velmi vysokou hodnotou CČ se použije jako referenční palivo s vyšší hodnotou CČ n-hexadekan (cetan 100 CČ). Pro měření obvyklých paliv mezi 30 - 65 CČ se používají směsi sekundárních referenčních paliv.

Měření se provádí tak, že se nastaví ruční regulační kolo ke změně kompresního poměru tak, aby byl průtah vznícení $13,0^\circ \pm 0,2^\circ$ otočení klikového hřídele (dále jen °KH). Hodnoty na ručním kole, které mění kompresní poměr zasouváním plunžru v rozmezí mezi 8:1 až 36:1, se mění a následně odečítají v daném pořadí (Obrázek 2). Podrobně se motorovou metodou určování CČ zabývají normy ASTM D613 a EN ISO 5165.

| | sekvence A | | | sekvence B | | |
|---------------------|------------|---|---|------------|---|---|
| Referenční palivo 1 | | 2 | 4 | | 3 | 5 |
| Testovaný vzorek | 1 | | 5 | 2 | | 6 |
| Referenční palivo 2 | | 3 | 6 | 1 | 4 | |

Obrázek 2: Pořadí měření vzorku a referenčních paliv

Hodnota CČ je pak dána vztahem (2).

$$C\check{C}_{VZ} = C\check{C}_{NRP} + \left(\frac{HW_{VZ} - HW_{NRP}}{HW_{VRP} - HW_{NRP}} \right) \cdot (C\check{C}_{VRP} - C\check{C}_{NRP}) \quad (2) [51]$$

$C\check{C}_{VZ}$ = Cetanové číslo vzorku

$C\check{C}_{NRP}$ = Cetanové číslo referenčního paliva s nižší hodnotou CČ

$C\check{C}_{VRP}$ = Cetanové číslo referenčního paliva s vyšší hodnotou CČ

HW_{VZ} = Odečtená hodnota na regulačním kole u vzorku

HW_{NRP} = Odečtená hodnota na regulačním kole u referenčního paliva s nižším CČ

HW_{VRP} = Odečtená hodnota na regulačním kole u referenčního paliva s vyšším CČ



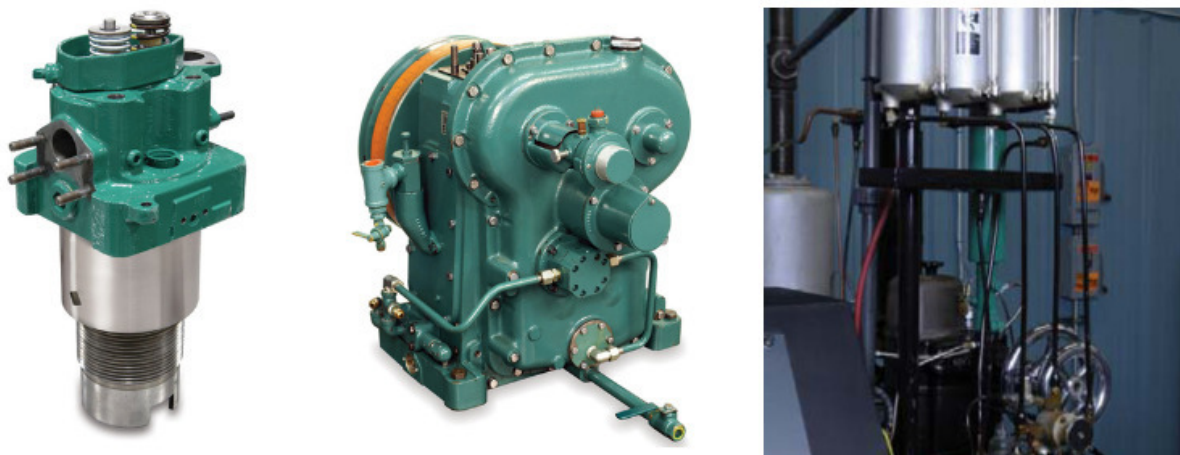
Obrázek 3: Jednoválcový zkušební motor firmy Waukesha Motor (model CFR F5)[46]

Technická data motoru:

| | |
|----------------------|-----------------------|
| Vrtání | = 82,55 mm |
| Zdvih | = 114,3 mm |
| Kompresní poměr | = 8:1 až 36:1 |
| otvírací tlak trysek | = $10,3 \pm 0,34$ MPa |

Hlavní části motoru (Obrázek 4):

1. hlava válců s plynule měnitelným kompresním poměrem dovoluje měnit kompresní poměr za chodu motoru,
2. kliková skříň vychází ze starších modelů motoru a nabízí snadnou údržbu a výměnu dílů,
3. palivový systém umožňuje snadno přepínat mezi třemi testovanými palivy (dvě referenční a testovaný vzorek).



Obrázek 4: Hlavní komponenty motoru CFR F5 (zleva: hlava válců, kliková skříň, palivový systém) [46]

Vývoj této metody začal již v roce 1931, kdy firma Waukesha Motor Co vyšla z konstrukce jednoválcového motoru do té doby používaného k určování oktanového čísla paliv. Původní motor s proměnným kompresním poměrem (dnes známý jako CFR motor) byl přepracován a v roce 1941 byl předveden jako motor pro měření vznětlivosti paliv. V tom samém roce byla uvedena v platnost první verze normy ASTM D 613. Konstrukce motoru se kromě několika malých úprav dochovala nezměněná až do dnešní doby. Tato skutečnost kontrastuje s progresivním vývojem moderních vznětových motorů. Například hodnota otvácího tlaku $10,3 \pm 0,34$ MPa poukazuje na mnohonásobně nižší vstřikovací tlaky, než jsou dnes běžné u moderních vznětových motorů. Takto nízký vstřikovací tlak má samozřejmě vliv na velikost středního průměru kapek a i velikost relativní rychlosti mezi palivem a vzduchem. Další nevýhodou této metody je vysoká pořizovací cena a spotřeba drahých referenčních paliv, čímž je dána vysoká cena jednotlivých měření. Navzdory výše zmíněnému je dnes stanovování hodnoty CČ pomocí této normy považováno za klasický a konzervativní způsob určování CČ, a vše nasvědčuje tomu, že se tato metoda s malými změnami bude používat ještě mnoho let. Nedávné studie vypracované na základě měření vznětlivosti paliv pomocí zařízení se spalovací komorou stálého objemu ukazují, že pouhá hodnota CČ zjištěná motorovou metodou nemusí zahrnovat všechny informace o vlivu paliva na výkonové parametry. Důkladné pochopení problematiky samovznícení paliv je nezbytné k udržení současné rychlosti vývoje moderních vznětových motorů a to hlavně v oblasti vstřiku paliva.

3.3.2 Laboratorní metoda stanovení cetanového indexu

Cetanový index je číselně podobný hodnotě cetanového čísla (např. 46 CI \approx 51 CČ). Jeho stanovení se provádí výpočtem při znalosti některých bodů destilační křivky paliva a jeho hustoty. Metoda stanovení je popsána v normě ASTM D 976, nebo EN ISO 4264. Příklad výpočtu je uveden ve vztahu (3).

$$CI = 454,74 - 1641,416 \cdot D + 774,74 \cdot D^2 - 0,554 \cdot T + 97,803 \cdot (\log T)^2 \quad (3)$$

T - teplota ve °C, při které predestiluje 50 % obj. vzorku

D - hustota vzorku při 15 °C vyjádřená v kg/dm³

Výhodou této metody je jednoduchost, rychlost a absence složitého technického zařízení. Nevýhodou je však nízká citlivost cetanového indexu na obsah zvyšovačů cetanového čísla jako je dnes běžně používaný 2-EHN. Cetanový index koreluje s hodnotou cetanového čísla pouze v případě, že měřený vzorek neobsahuje zvyšovače cetanového čísla, jako jsou oksylichovadla a nitráty. Do motorové nafty se před prodejem koncovému zákazníkovi přidává 2-EHN v rozmezí od 0 do 1300 ppm, čímž se zvětší hodnota CČ i o více než 10 jednotek. Mnoho motoristů si do motorové nafty přidá aditiva obsahující např. 2-EHN přímo u čerpací stanice. Cetanový index takto vzniklých směsí může být nižší i o 20 jednotek, než je hodnota cetanového čísla.

Z výše uvedeného je patrné, že se dnes k zjištění vznětlivosti motorových paliv tato metoda nedá použít, může ale poskytnout užitečné informace o vlastnostech základové nafty. Zahrnuje v sobě vlastnosti převážně ovlivňující fyzikální část průtahu vznícení.

3.3.3 Metody založené na měření průtahu vznícení

Současné metody určování OCČ pomocí přístroje se spalovací komorou konstantního objemu využívají dobré korelace mezi hodnotou průtahu vznícení a hodnotou OCČ. Pro odlišení výsledků získaných těmito metodami od výsledků metody motorové se používá namísto CČ jednotka OCČ (odvozené CČ). V anglické literatuře se používá DCN (Derived Cetane Number). Základ těchto metod spočívá ve vstříknutí jedné dávky paliva do ohřátého stlačeného vzduchu a měření doby mezi počátkem vstříku a počátkem nárůstu tlaku v komoře vlivem uvolňování tepla.

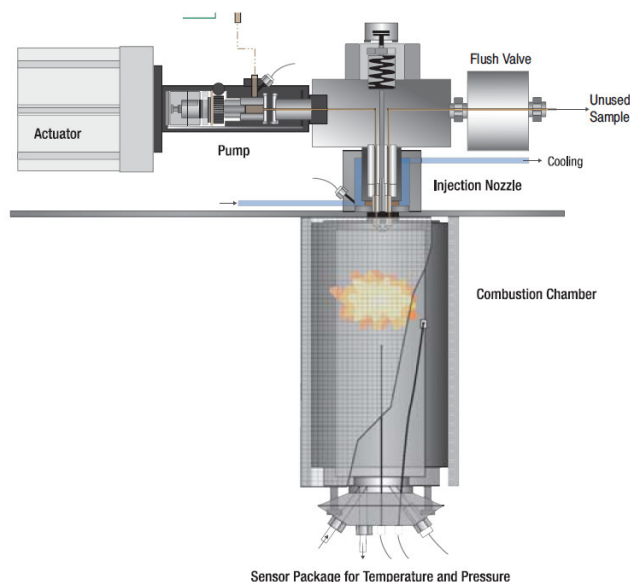
FIT (Fuel Ignition Testing for Derived Cetane Number of Diesel Fuels)

Stejně jako v případě CFR motoru je výrobcem tohoto zařízení firma Waukesha, která tímto modelem doplňuje nabídku jednoválcových zkušebních motorů.

Metoda je popsána v normě ASTM D7170 a IP 567.



Main Components of FIT



Obrázek 5: FIT se zobrazením hlavních komponent zařízení [45]

Technická data:

- měřicí rozsah: 30 - 80 OCČ,
- objem komory: 600 cm³,
- vstřikovací tlak: 100 bar,
- opakovatelnost: ± 0,71 OCČ,
- reprodukovatelnost: ± 1,5 OCČ.

IQT (Ignition Quality Tester)

Toto zařízení od firmy AET (Advanced Engine Technology Ltd.) se používá pro měření paliv s OCČ od 32 do 65. Závislost cetanového čísla na průtahu vznícení u zařízení IQT udává vztah (4).

$$CN_{IQT} = 4,46 + \left(\frac{186,6}{ID_{IQT}} \right) \quad (4)$$

Pro paliva se vznětlivostí mimo uvedený rozsah, tak jako s naměřeným průtahem vznícení nižším než 3,1 ms, nebo vyšším než 6,5 ms, je možné použít vztah (5). To však vede k nižší přesnosti určení hodnoty OCČ.

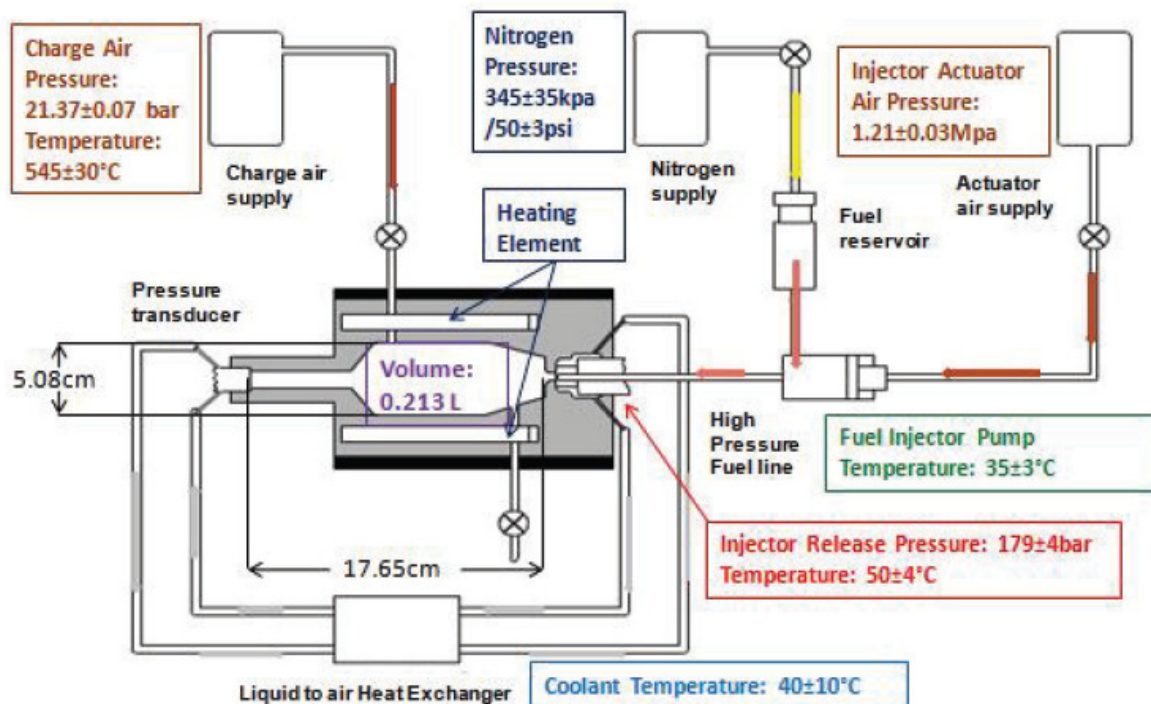
$$CN_{IQT} = 83,99 \cdot (ID_{IQT} - 1,512)^{-0,658} + 3,547 \quad (5)$$

CN_{IQT} - hodnota výsledného cetanového čísla přístroje IQT

ID_{IQT} - průtah vznícení naměřený přístrojem IQT v ms



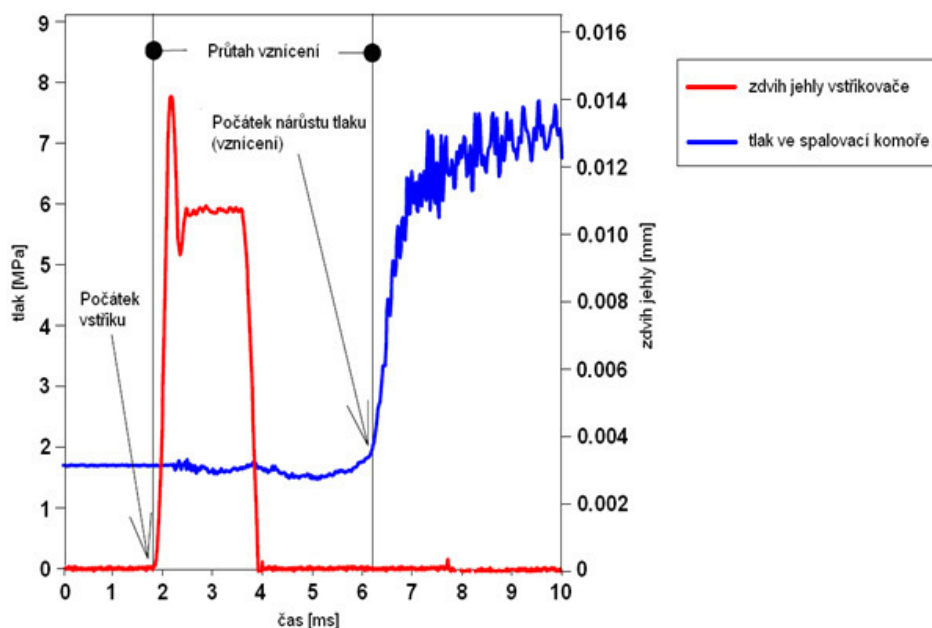
Obrázek 6: Hlavní část zařízení IQT [41]



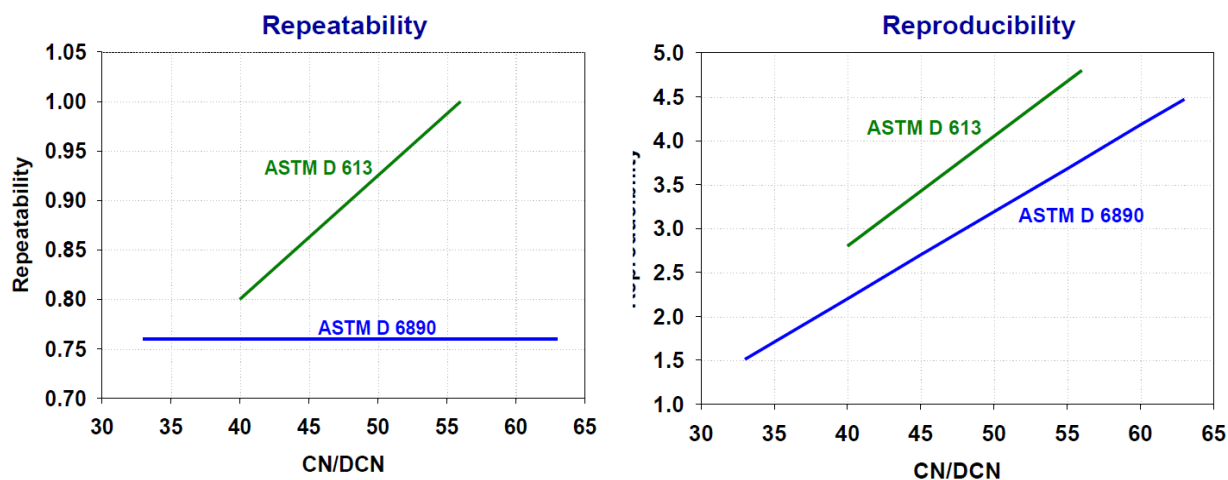
Obrázek 7: Schéma zařízení IQT [34]

Technická data:

- měřicí rozsah: 32 - 65 OCČ (se sníženou přesností je možné využít širší rozsah),
- objem komory: 213 cm³,
- vstřikovací tlak: 180 bar,
- opakovatelnost: $\pm 0,88$ OCČ,
- reprodukovatelnost: 3,53 OCČ pro palivo s 52 OCČ.



Graf 1: Příklad průběhů měřených signálů včetně zobrazení důležitých bodů. [40].



Graf 2: Porovnání opakovatelnosti a reprodukovatelnosti IQT (ASTM D6890) s motorovou metodou (ASTM D613) [40]

Graf 2 znázorňuje kromě porovnání přesnosti motorové metody (ASTM D613) s měřeními na zařízení IQT (ASTM D 6890) také závislost opakovatelnosti a reprodukovatelnosti na hodnotě CČ. Pro hodnoty CČ nad 51 jednotek (minimum pro motorovou naftu podle ČSN EN 590) překračuje reprodukovatelnost obou metod hodnotou 3 respektive 4 jednotky CČ. Data byla získána měřeními v 10 laboratořích [41].

Herzog Cetane ID 510 (CID 510)

V roce 2012 vstoupily v platnost normy ASTM D975 a EN 16715, které poskytují pravidla a návod měření na tomto zařízení. Tomuto zařízení je věnována část 8. kapitoly.



Obrázek 8: Zařízení společnosti PAC – CID 510 [43]

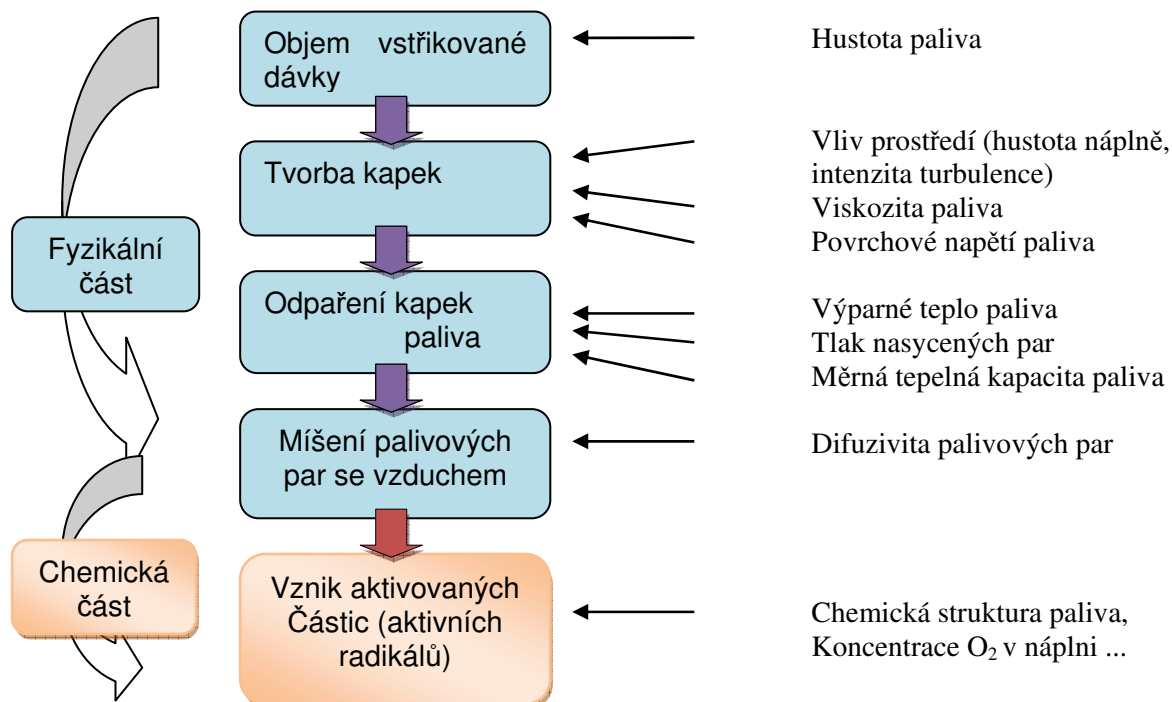
Technická data:

- měřicí rozsah: 35 - 100 OCČ,
- náplň: syntetický vzduch (20% O₂, 80% N₂),
- vstřikovací tlak: 1000 bar,
- opakovatelnost: $\pm 0,66$ OCČ @ 50 OCČ,
- reprodukovatelnost: 1,86 OCČ @ 50 OCČ.

4 FYZIKÁLNÍ A CHEMICKÉ PROCESY SPALOVÁNÍ HETEROGENNÍ SMĚSI

4.1 Průtah vznícení heterogenní směsi

Hoření heterogenní směsi paliva pro vznětové motory a vzduchu je velice složitý jev, který je závislý nejenom na fyzikálních a chemických vlastnostech paliv, ale také na podmínkách vstřiku a prostředí (teplota, tlak, chemické složení...). Aby byla měření různých paliv mezi sebou vzájemně porovnatelná, je důležité dodržet podmínky při jednotlivých měřeních naprosto stejné nebo je zaznamenávat a najít souvislosti mezi nimi a hodnotou CČ. Nalezení těchto souvislostí potom může vést k eliminaci chyb při měření. Nejvýznamněji ze všech měřených veličin koreluje s hodnotou cetanového čísla průtah vznícení (čas mezi počátkem vstřiku paliva a počátkem zvyšování tlaku náplně). Průtah vznícení je výsledkem fyzikálních a chemických dějů (viz Obrázek 9).



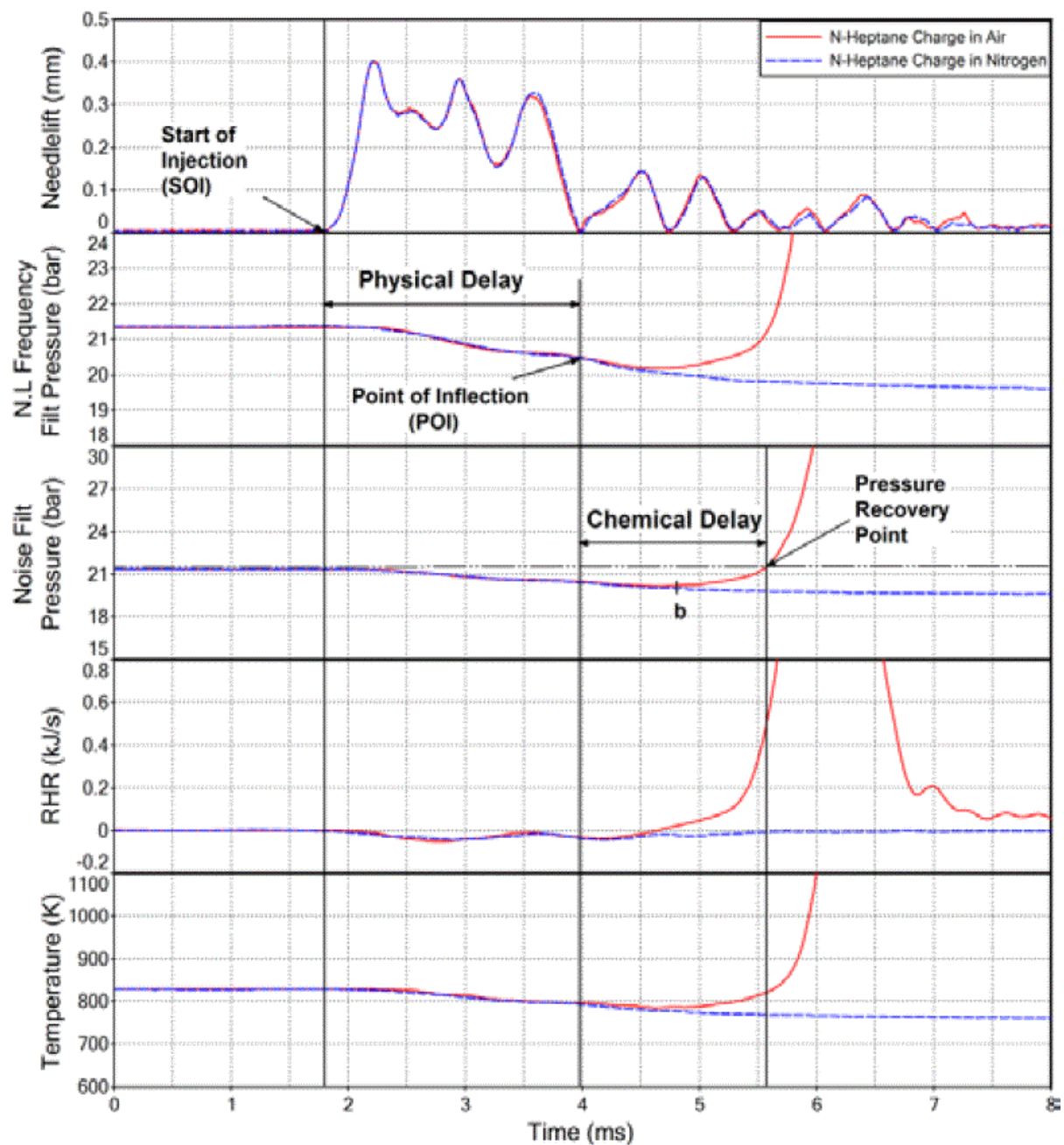
Obrázek 9: Jednotlivé části průtahu vznícení

V makroskopickém pohledu probíhá fyzikální i chemická část průtahu vznícení po určitou dobu společně. Překrývání těchto dvou částí je zapříčiněno jednak nehomogenními podmínkami, ale také poměrně dlouhou dobou vstřiku paliva. Část paliva, která vystříkla ze vstřikovače první, již v určitém čase dokončuje fyzikální část průtahu vznícení nebo u této části už dokonce probíhá část chemická, zatímco určitá část paliva teprve opouští vstřikovač.

Palivo na konci vstřiku je potom vstřikováno do odlišných podmínek, než palivo na počátku. Z tohoto pohledu se při určování průtahu vznícení nemá smysl zabývat celou dávkou paliva, ale pouze malou částí na počátku vstřiku. Tímto zjednodušením se potlačí vliv velikosti vstřikované dávky. Dále je možné vyjádřit průtah vznícení jako součet fyzikální a chemické části, což by v případě makroskopického pohledu na problematiku nebylo díky překrývání těchto částí možné.

K hlubšímu pochopení problematiky je zapotřebí určit velikost jednotlivých částí, tedy najít čas, ve kterém končí fyzikální a začíná chemická část průtahu vznícení. Z měřených fyzikálních veličin, jako je zdvih jehly vstřikovače a tlak náplně, je možné fyzikální a chemickou část od sebe oddělit poměrně jednoduchým experimentem. Při zachování počátečních podmínek vstřiku (teplota a tlak náplně) se vstříkne palivo do vzduchu a také do inertního prostředí (například 100% N_2). Porovnáním získaných průběhů tlaku, z těchto dvou variant měření můžeme najít čas počátku chemické části průtahu vznícení (viz Obrázek 10).

Za počátek chemické části se považuje okamžik, ve kterém se začne vytvářet rozdíl mezi naměřenými průběhy tlaku. Tento rozdíl ukazuje na počátek exotermických reakcí. Za konec chemické části průtahu vznícení je možné považovat zvýšení tlaku náplně na hodnotu, která byla měřena na počátku vstřiku. Téměř celá doba průtahu vznícení je potom doprovázena mírným snížením tlaku náplně. Míra poklesu tlaku je velmi závislá na vstřikovaném množství paliva, které svojí nízkou teplotou a odpařováním tento pokles způsobuje.



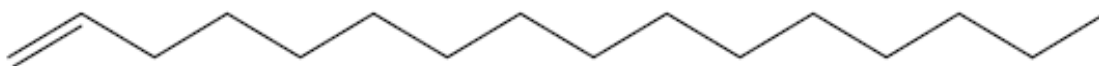
Obrázek 10: Zjišťování podílu fyzikální a chemické části na celkové době průtahu vznícení porovnáním vstřiku paliva do vzduchu a do dusíku. [34]

4.2 Vliv chemického složení a přísad

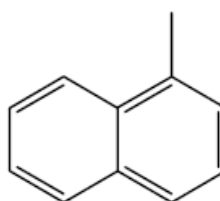
Cílem práce není uspořádat informace o vlivu konkrétních chemických sloučenin na hodnotu CČ směsí paliv. Výsledky měření různých chemických látek jsou popsány v mnoha publikacích. V této práci jsou tedy popsány pouze některé zobecněné závislosti.

4.2.1 Vliv chemické struktury paliva

Chemická struktura paliva může napovědět více o jeho vznětlivosti. Obrázek 11 zobrazuje chemickou strukturu vysoce vznětlivého cetanu (CČ 100). Naproti tomu je na obrázku 12 znázorněna chemická struktura alfa-metylnaftalenu (CČ 0), který je díky svým dvěma aromatickým prstencům velice odolný proti oxidaci.



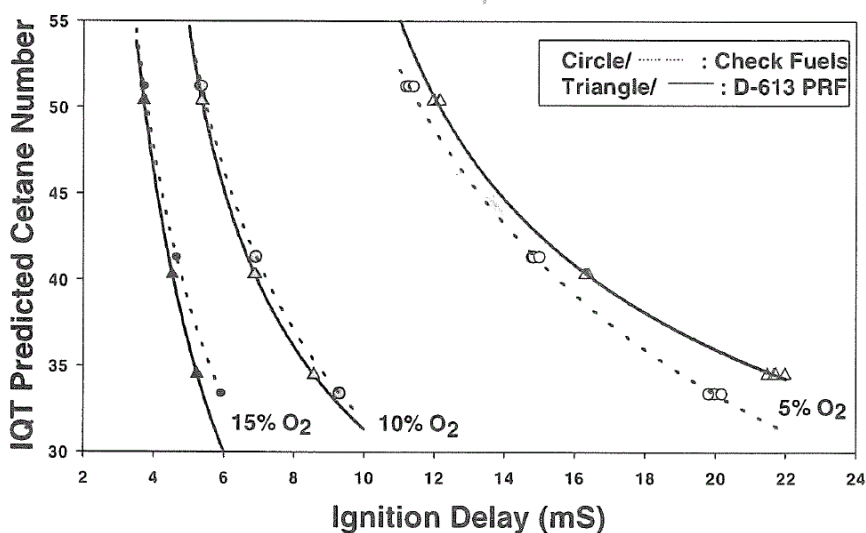
Obrázek 11: Chemická struktura cetanu



Obrázek 12: Chemická struktura alfa-metylnaftalenu

4.2.2 Vliv koncentrace kyslíku ve vzduchu na průtah vznícení

Většina dnešních motorů používá za účelem snižování emisí oxidů dusíku recirkulaci výfukových plynů (EGR). Snížení obsahu kyslíku v náplni nevede pouze ke snížení teploty spalování, ale také k prodloužení doby průtahy vznícení (viz Graf 3).

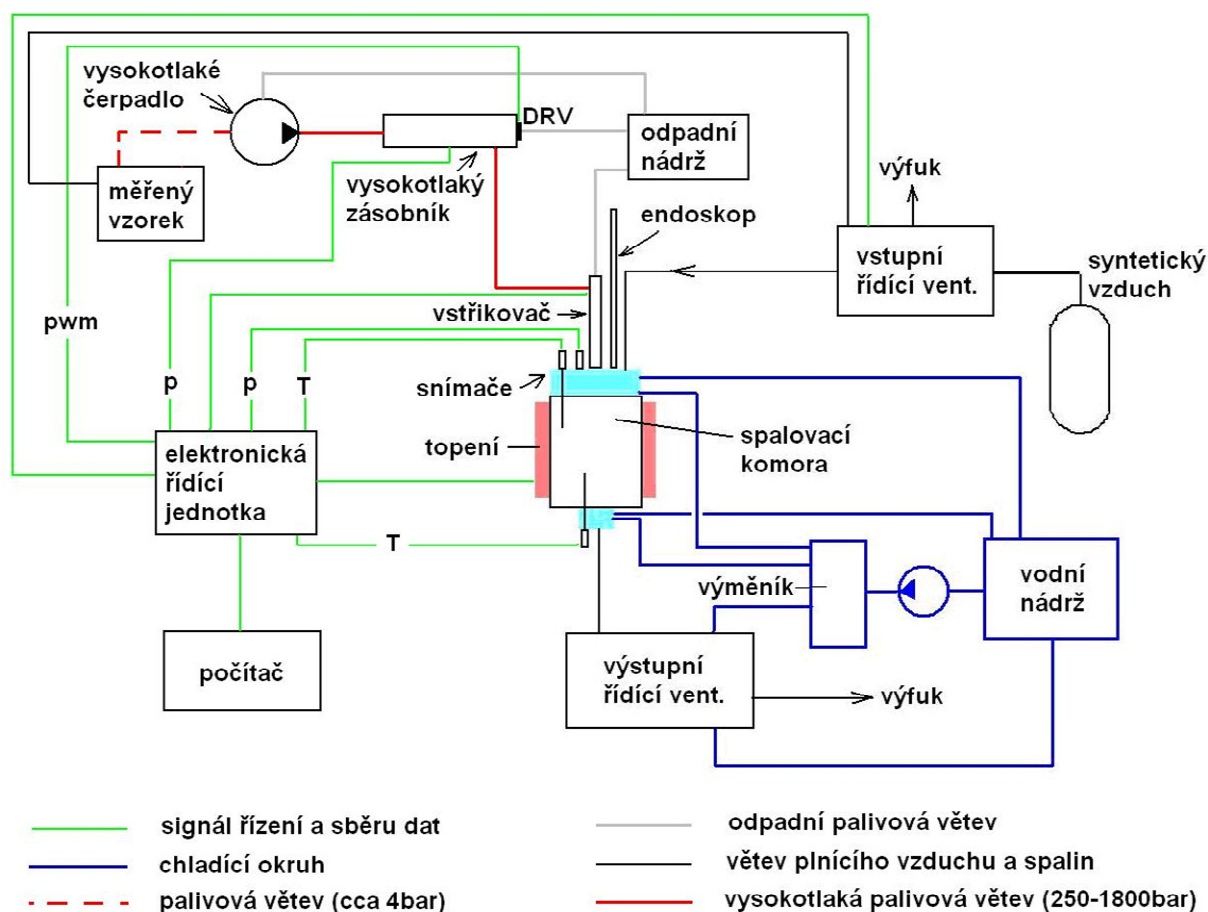


Graf 3: Vliv koncentrace kyslíku na průtah vznícení [1]

5 VÝVOJ A STAVBA ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ

Po seznámení se s problematikou měření vznětové charakteristiky paliv byl na konci roku 2006 vytvořen prvotní návrh uspořádání měřicího zařízení. Celková problematika byla rozdělena do několika funkčních celků popsaných v této kapitole. Konstrukce a výběr jednotlivých prvků podléhala v mnoha případech omezeným zdrojům. Drahé komponenty palivového systému darovala firma Bosch Diesel s.r.o. Rovněž těžko dostupná sekundární referenční paliva se podařilo získat zdarma. Při konstrukci byly zohledněny i technologické možnosti obrábění prototypové dílny KVM, aby bylo co největší množství operací provedeno na katedře.

5.1 Celkové schéma



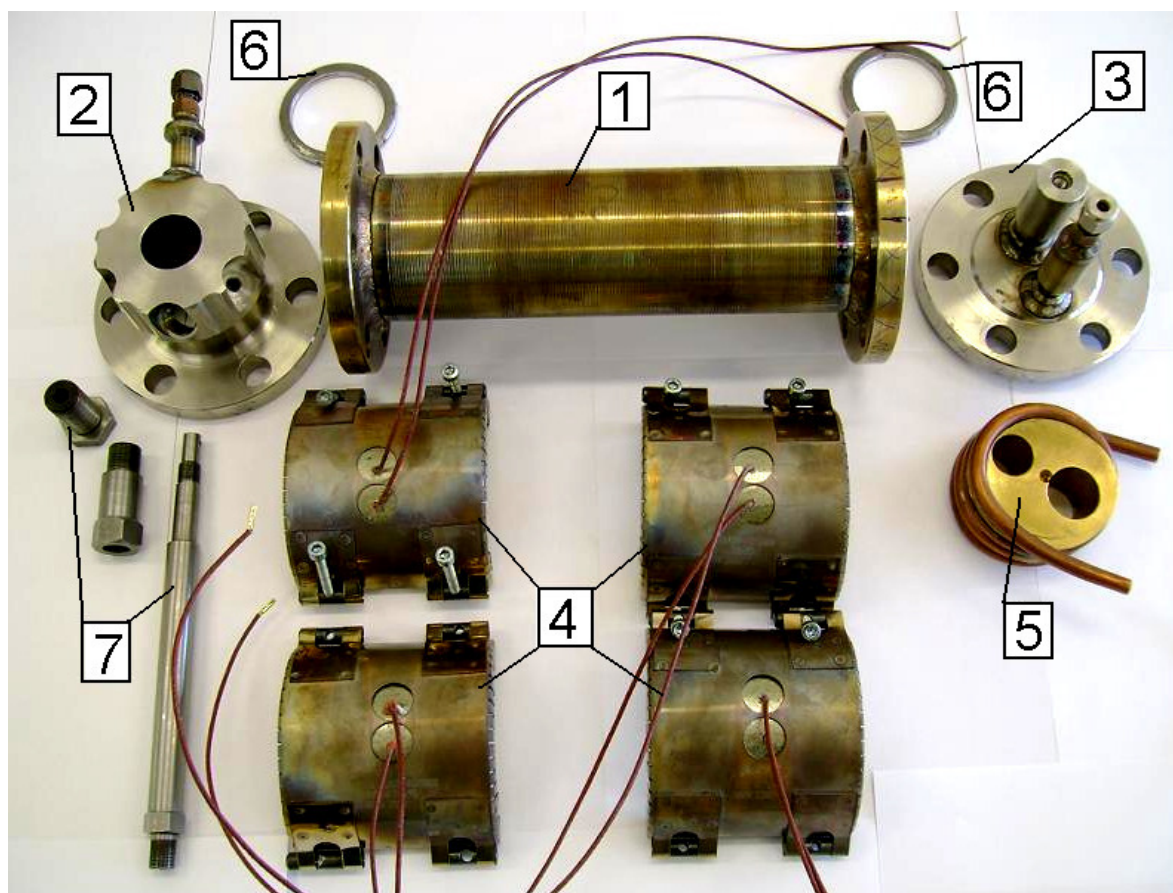
Obrázek 13: Celkové schéma zařízení

5.2 Vysokotlaká spalovací komora

Požadavky na konstrukci komory:

- velká dotyková plocha s vnějším topením. Měla by zajistit dostatečně dobrý přestup tepla mezi topením a komorou a zároveň nemít složitý tvar kvůli zakázkové výrobě topení,
- ostatečná pevnost i při vysokých teplotách (volba vhodného svařitelného materiálu),
- těsnost,
- snadná demontáž pro případ čištění,
- možnost použití endoskopu pro sledování dějů uvnitř komory,
- možnost nahlédnutí popřípadě svícení. Endoskop kvůli chlazení neumožňuje zároveň svícení, tento problém bude vyřešen jiným vstupem, který bude chráněný safírovým okénkem,
- volné pozice pro umístění snímačů tlaku a termočlánků.

Aby bylo těmto požadavkům v co největší míře vyhověno, je komora sestavena ze tří hlavních částí. Prostřední, vyhřívaná část (pozice 1 na obrázku 14), je nerezová trubka s navařenými přírubami, na které jsou přišroubovány dvě uzavírací čela. Vstupní čelo (pozice 2) je osazeno většinou měřících snímačů, endoskopem a okénkem se safírovým sklíčkem. V ose tohoto čela je ve vodou chlazené mosazné vložce umístěn vstřikovač. Dále tento prvek obsahuje vstup, který bude použit pro přístup čerstvého vzduchu. Třetí hlavní částí komory je výstupní čelo (pozice 3). Na tomto čele je umístěn výstup spalin a jedna pozice pro termočlánek. Toto čelo je také osazeno mosazným chlazením, aby bylo možné místo termočlánku umístit snímač tlaku. K tomuto čelu je možné připevnit ocelové vložky k zmenšení objemu komory.



Obrázek 14: Hlavní části komory.

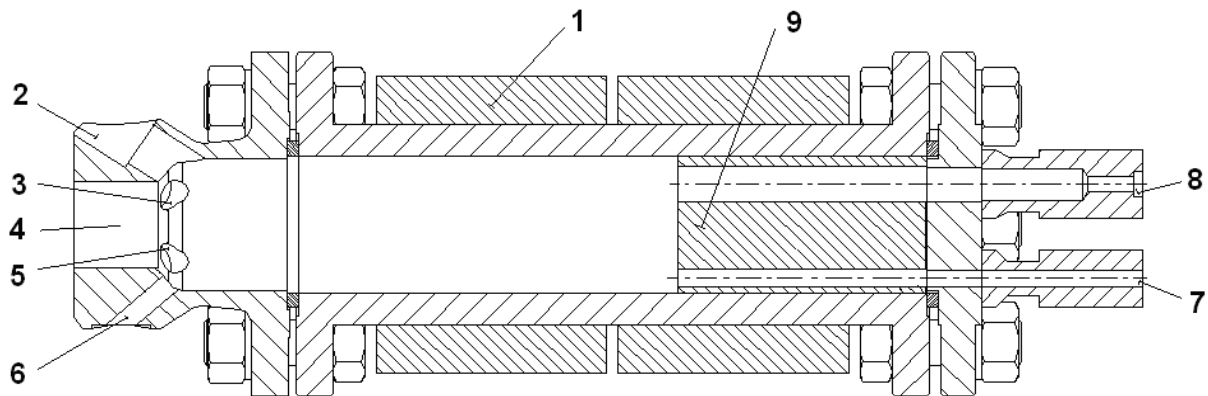
- 1 - střední část komory
- 2 - vstupní čelo
- 3 - výstupní čelo
- 4 - topení (4 x 720 W)
- 5 - chlazení výstupního čela
- 6 - spirálové těsnění
- 7 - pouzdro endoskopu

Parametry komory:

Objem komory: cca 120 až 420 cm³ závisí na velikosti vložky (Obrázek 15, pozice 9).

Maximální tlak v komoře při teplotě stěny 600 °C: 22 MPa (bezpečnost 1,1).

Maximální tlak v komoře při teplotě stěny 900 °C: 7 MPa (bezpečnost 1,1).

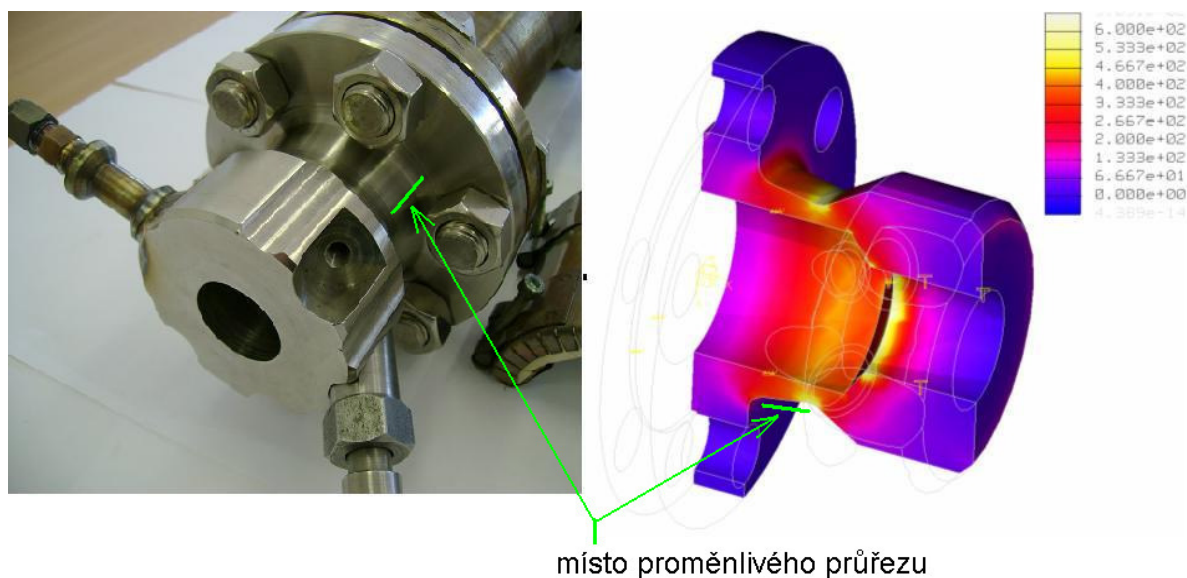


Obrázek 15: Ilustrativní řez komory.

1. topení
2. otvor pro pouzdro endoskopu
3. otvor pro snímač tlaku
4. otvor pro vložku vstřikovače
5. otvor pro držák termočlánu
6. vstup čerstvého vzduch
7. výstup čerstvého vzduchu
8. otvor pro snímač tlaku nebo termočlánek
9. vložka zmenšující objem komory

5.2.1 Konstrukce vstupního čela komory

Největším problémem při návrhu tvaru a rozměrů tohoto prvku bylo nalezení kompromisu mezi protichůdnými požadavky uvedenými v předchozí kapitole. Nalezení vhodného kompromisu mezi maximální pevností (bezpečností) a minimálním přestupem tepla mezi teplou a studenou částí vstupního čela byl poměrně složitý úkol. Změna průřezu mezi těmito částmi (viz obrázek 16) byla pomocí programu Pro/ENGINEER navržena tak, aby byla docílena pokud možno konstantní bezpečnost, která vyžadovala rozdílné napětí v materiálu. Tomuto požadavku bylo těžké vyhovět hlavně kvůli neznalosti exaktního průběhu dovoleného napětí použité oceli mezi teplotami 600 °C a 900 °C. Dále bylo problematické přesně určit okrajové podmínky potřebné k výpočtu přestupu tepla.

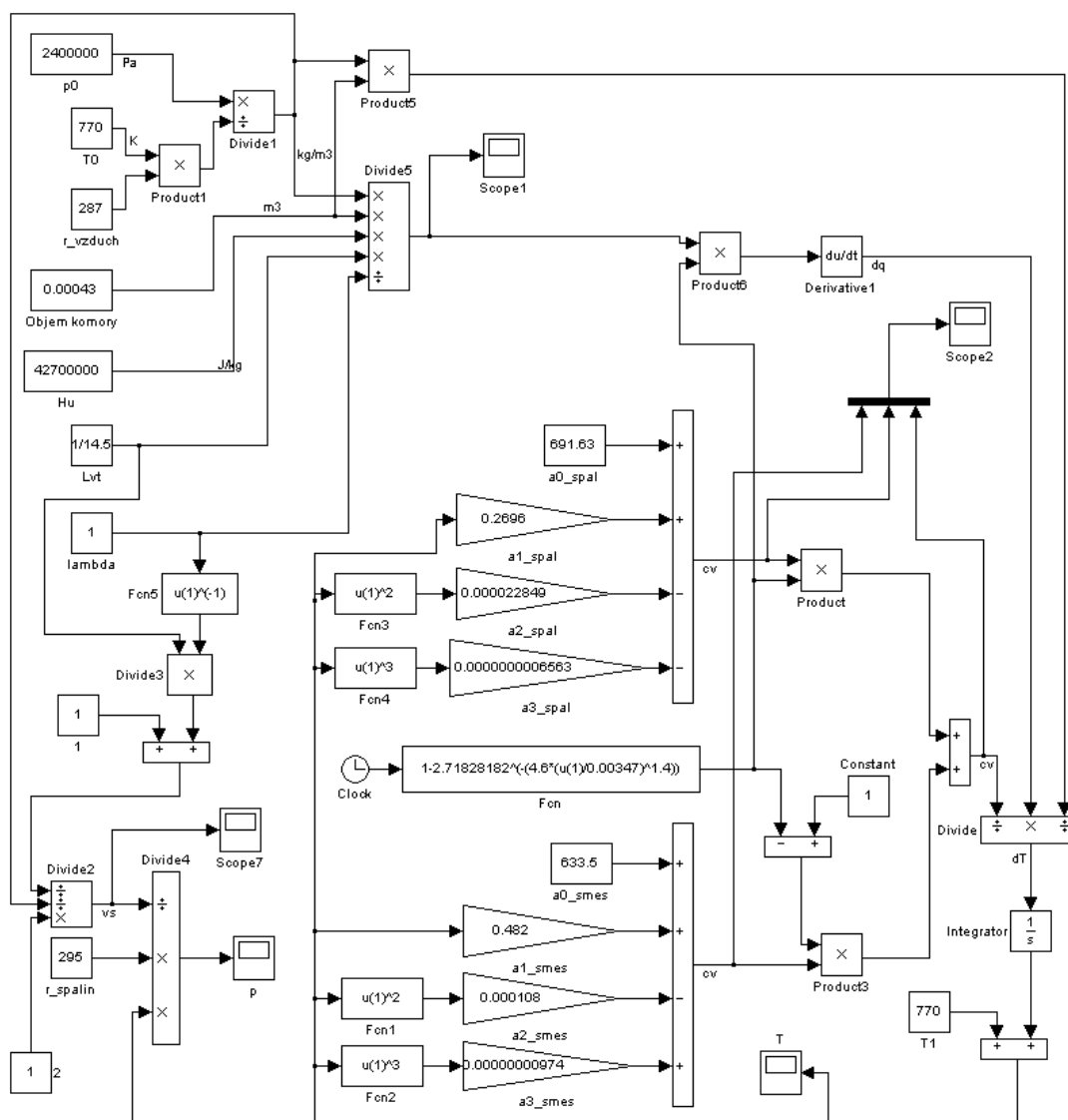


Obrázek 16: Proměnlivý průřez vstupního čela komory

5.2.2 Výpočet maximálního tlaku v komoře

Znalost maximálního možného tlaku v komoře je velmi důležitá ke konstrukčnímu návrhu vysokoteplotní a vysokotlaké komory. Protože je výpočet díky měnící se měrné tepelné kapacitě izochorické v závislosti na podílu a teplotě spalín poměrně složitý, byl k řešení vytvořen zjednodušený model v programu Matlab Simulink (Obrázek 17). Výpočtový model nezahrnuje odvod tepla do stěn komory, protože je průběh hoření velmi krátký. Odvodem tepla do stěn by se maximální tlak v komoře snížil, a proto se tento pokles pro kontrolní výpočet pevnosti komory neuvažoval. Model počítá s průběhem rychlosti vyhořívání směsi podle Wiebeho charakteristické rovnice s parametrem m o velikosti 0,4 (obvyklé pro vznětové motory). Průběh vyhořívání ovlivňuje měrnou tepelnou kapacitu izochorickou, která je závislá na podílu spalín a na teplotě (viz vztah 6, tabulka 1, graf 4).

Nejvyšší tlaky jsou v komoře pro součinitel přebytku vzduchu $\lambda=1$. To je dáno tím, že je spálen teoreticky všechen kyslík ve vzduchu a větší množství paliva by směs už jen ochladilo. Měřicí zařízení bude sice pracovat s výrazně chudší směsí, s přebytkem vzduchu okolo $\lambda=4$, ale v případě poruchy vypouštěcích ventilů nebo palivového systému musí komora vydržet i tlak při $\lambda=1$.

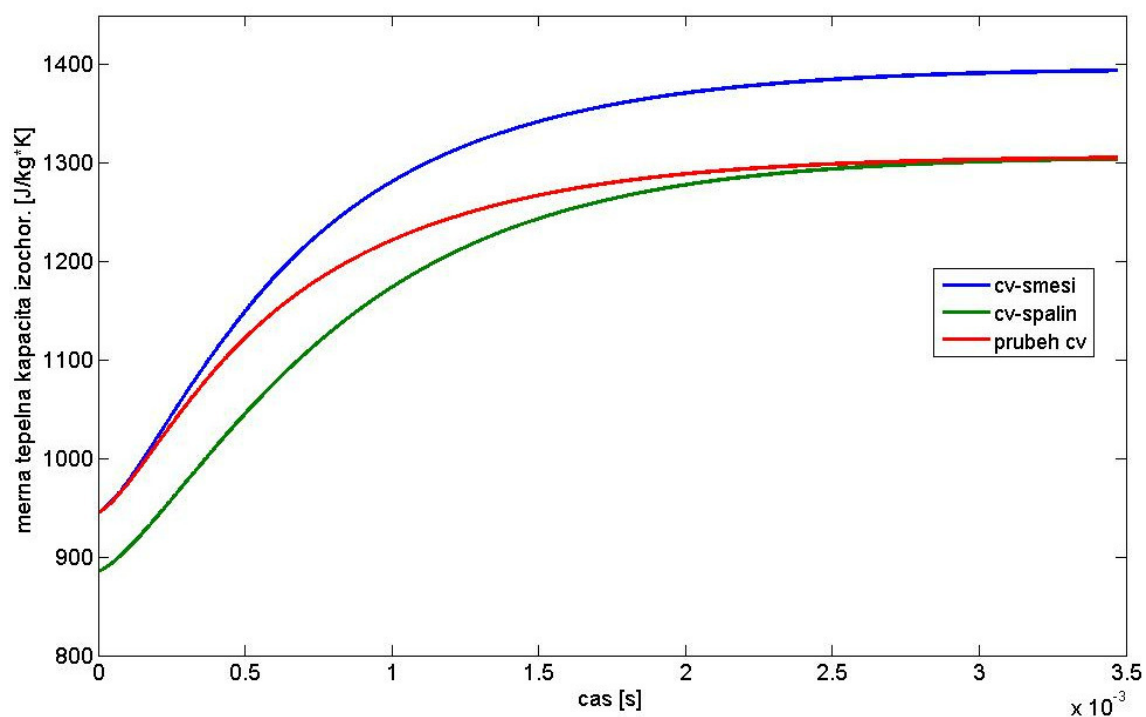


Obrázek 17: Model pro výpočet průběhu teploty a tlaku v komoře (Matlab Simulink).

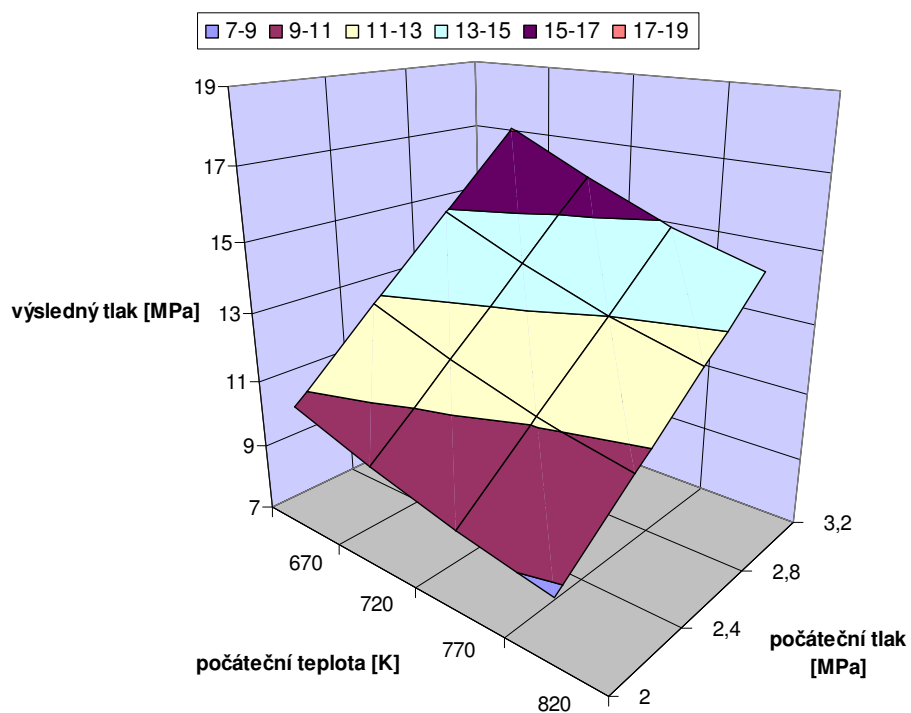
$$cv = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + a_3 \cdot T^3 \quad (6)$$

| | Směs: nafta + vzduch | Spaliny |
|-----------|-------------------------|------------------------|
| a0 | 633,5 | 691 |
| a1 | 0,482 | 0,2696 |
| a2 | $-1,08 \cdot 10^{-4}$ | $-2,285 \cdot 10^{-5}$ |
| a3 | $9,74 \cdot 10^{-9}$ | $-6,563 \cdot 10^{-9}$ |

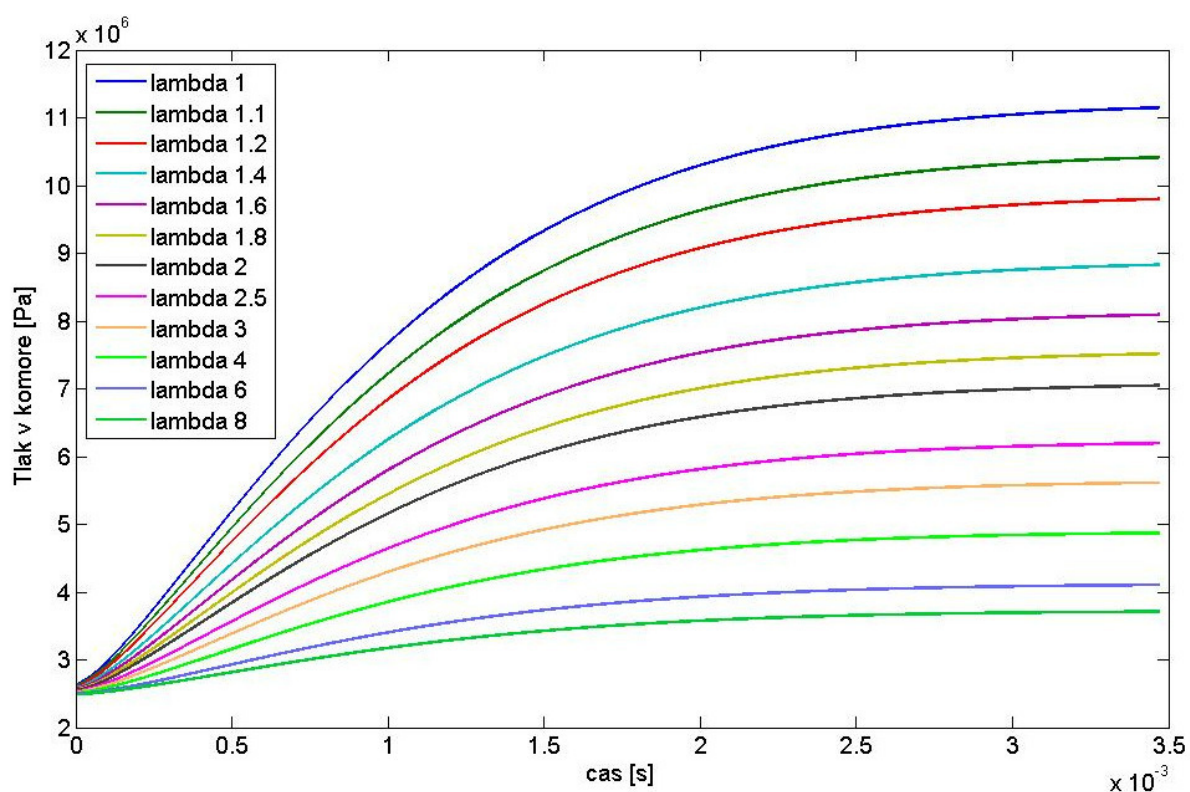
Tabulka 1: Koeficienty pro výpočet c_v směsi nafty se vzduchem a spalin



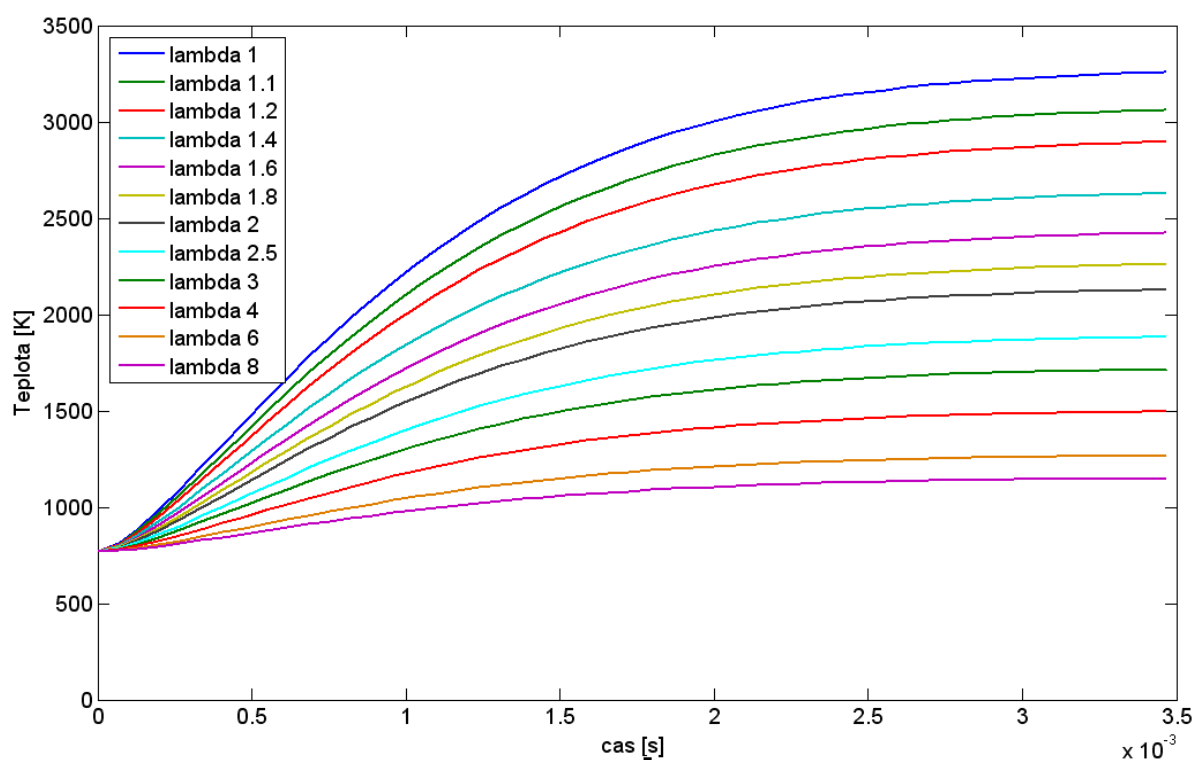
Graf 4: Průběh c_v v závislosti na teplotě a podílu spalin.



Graf 5: Výsledný maximální tlak v komoře v závislosti na různých teplotách a tlacích vzduchu v okamžiku vstříku paliva (pro $\lambda=1$).



Graf 6: Závislost maximálního tlaku v komoře na lambda směsi.



Graf 7: Závislost maximální teploty v komoře na lambda směsi.

Grafy 6 a 7 znázorňují průběh tlaku a teploty spalín v závislosti na čase a součiniteli přebytku vzduchu λ , pro zvolenou počáteční teplotu a tlak vzduchu v době vstříku

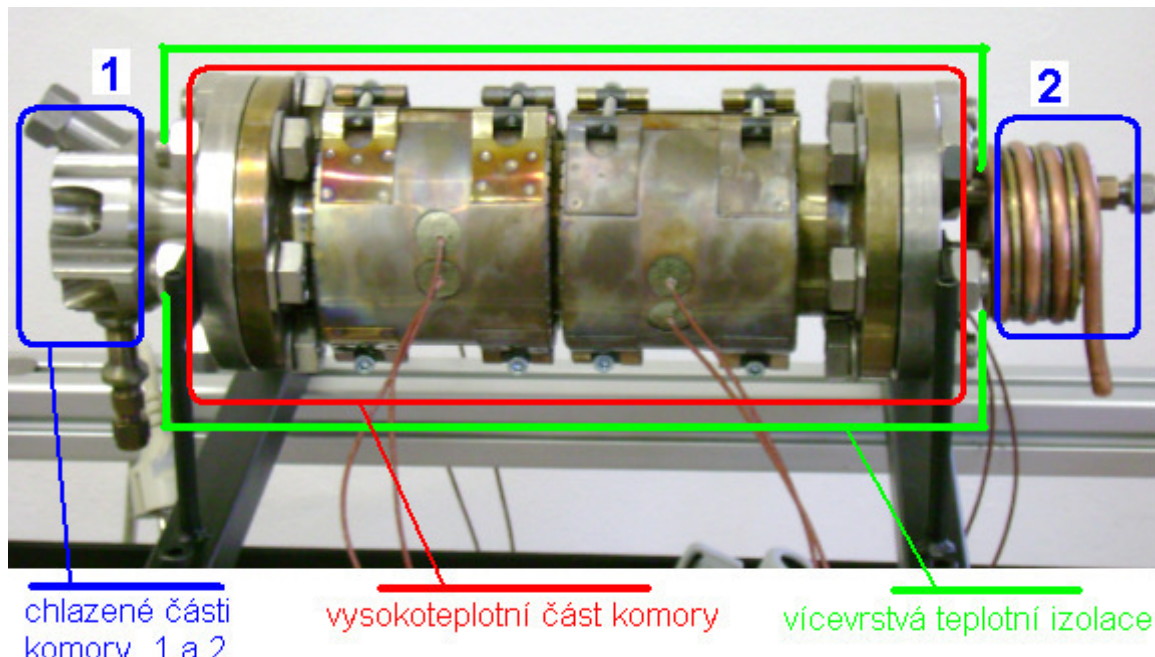
770 K a 2,4 MPa. Průběhy tlaků v komoře (viz Graf 6) pro různě bohaté směsi potvrzují předpoklad, že nejvyšší hodnoty tlaku budou v případě hoření stechiometrické směsi. Zařízení bude provozováno se součinitelem přebytku vzduchu $\lambda \sim 3$, což povede přibližně k polovičním hodnotám absolutního tlaku, než v případě $\lambda = 1$.

Maximální teploty v grafu nad 3000 K by při reálném průběhu nenastaly kvůli vlivu disociace. Reálný průběh teplot a tlaků v komoře je výsledkem velice složitých chemických a termodynamických dějů a proto je k jeho stanovení vhodnější měření. Vyšší vypočtené teploty vedou k vyšším tlakům. Ve skutečnosti tedy bude komora zkonstruována s vyšším součinitelem bezpečnosti, než vychází v kontrolním výpočtu.

5.3 Topení

Topení by mělo mít dostatečný výkon na vyhřátí vysokoteplotní části komory na teplotu kolem 900 K. Skládá se ze čtyř půlkruhových těles, každé těleso má maximální výkon 720 W. Celkový maximální výkon tedy je 2880 W. Tento výkon by měl s dostatečnou rezervou pokrýt přestupy tepla mezi chlazenými částmi a vysokoteplotní částí komory (viz Obrázek 18).

Z hlediska zástavby je možné umístit topná tělesa pouze po válcové ploše mezi přírubami. Přestupu tepla čely nelze zabránit, protože jsou v nich umístěny prvky, které nesmí být vystaveny tak vysokým teplotám, jaké jsou zapotřebí ve vysokoteplotní části komory. Tyto prvky jsou chlazeny pomocí mosazných vodou chlazených těles. Vnější plocha topných těles spolu s přírubami je odizolována 5 mm silnou keramickou tkaninou a 40 mm silnou skelnou vatou.



Obrázek 18: Nezaizolovaná vysokoteplotní komora osazena topnými tělesy

5.3.1 Určení přestupu tepla vnější válcovou izolací

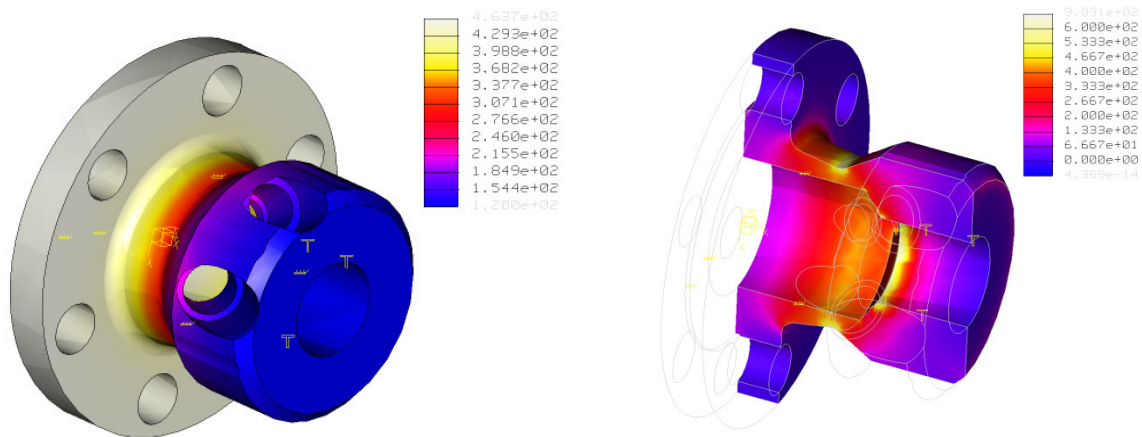
$$t_1 - t_2 + t_2 - t_3 = t_1 - t_3 = 650 \text{ K}$$

(uvažovaný teplotní spád daný okrajovými podmínkami)

$$P_{1,3} = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (t_1 - t_3)}{\left(\frac{1}{\lambda_{1,2}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_{1,2}} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} \right)} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,48 \cdot 650}{\left(\frac{1}{0,063} \cdot \ln \frac{0,13}{0,12} + \frac{1}{0,047} \cdot \ln \frac{0,21}{0,13} \right)} = 171 \text{ W} \quad (7)$$

5.3.2 Vedení tepla chlazenými čely komory

Čela komory mají na rozdíl od válcového pláště komory poměrně složitější tvar. Proto je vedení čely počítáno pomocí programu Pro-Mechanika. Okrajové podmínky jsou stanoveny tak, aby v okolí snímačů a vstřikovače nepřekročily teploty maximální provozní teploty těchto prvků. Způsob určení tepelného výkonu je pro jednoduchost uveden pouze na vstupním čele.



Obrázek 19: Teplota chlazeného vstupního čela a hustota tepelného toku

Hustota tepelného toku (FLUX) je v místě s jednoduchou geometrií vynásobena plochou mezikruží. Vyšel tak tepelný výkon, který se odvede chlazením.

$$P_{chl_1} = FLUX \cdot PLOCHA = 390 \frac{N}{mm \cdot s} \cdot 982 mm^2 = 382980 \frac{N \cdot mm}{s} = 383 W \quad (8)$$

V případě druhého čela na straně výfuku spalin byl obdobným způsobem vypočten tepelný výkon $P_{chl_2} = 236 W$. Celkové nároky na topení, potřebné k pokrytí těchto ztrát a udržení žádané teploty, jsou:

$$P_{celk} = P_{chl_1} + P_{chl_2} + P_{1,3} = 383 + 236 + 171 = 790 W \quad (9)$$

5.3.3 Odhad doby ohřevu

Na ohřev na požadovanou počáteční teplotu zbývá výkonová rezerva cca 2000 W. Celková hmotnost komory je 8,6 kg. Komora je z největší části vyrobena ze žáruvzdorné nerezové oceli s měrnou tepelnou kapacitou $c = 0,457 kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$. Proměnlivý ztrátový výkon odvedený do chladicí kapaliny bude lineárně závislý na teplotě a bude postupně narůstat od 0 W do 790 W.

energie dodaná topidlem = akumulace + ztráty

$$2880 \cdot T - \int_0^T t \cdot \frac{790}{T} \cdot dt = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (10)$$

$$2880 \text{ W} \cdot T - 395 \text{ W} \cdot T = 8,6 \text{ kg} \cdot 457 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 480 \text{ K} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} T &= 759 \text{ s} \\ T &\cong 13 \text{ min} \end{aligned} \quad (12)$$

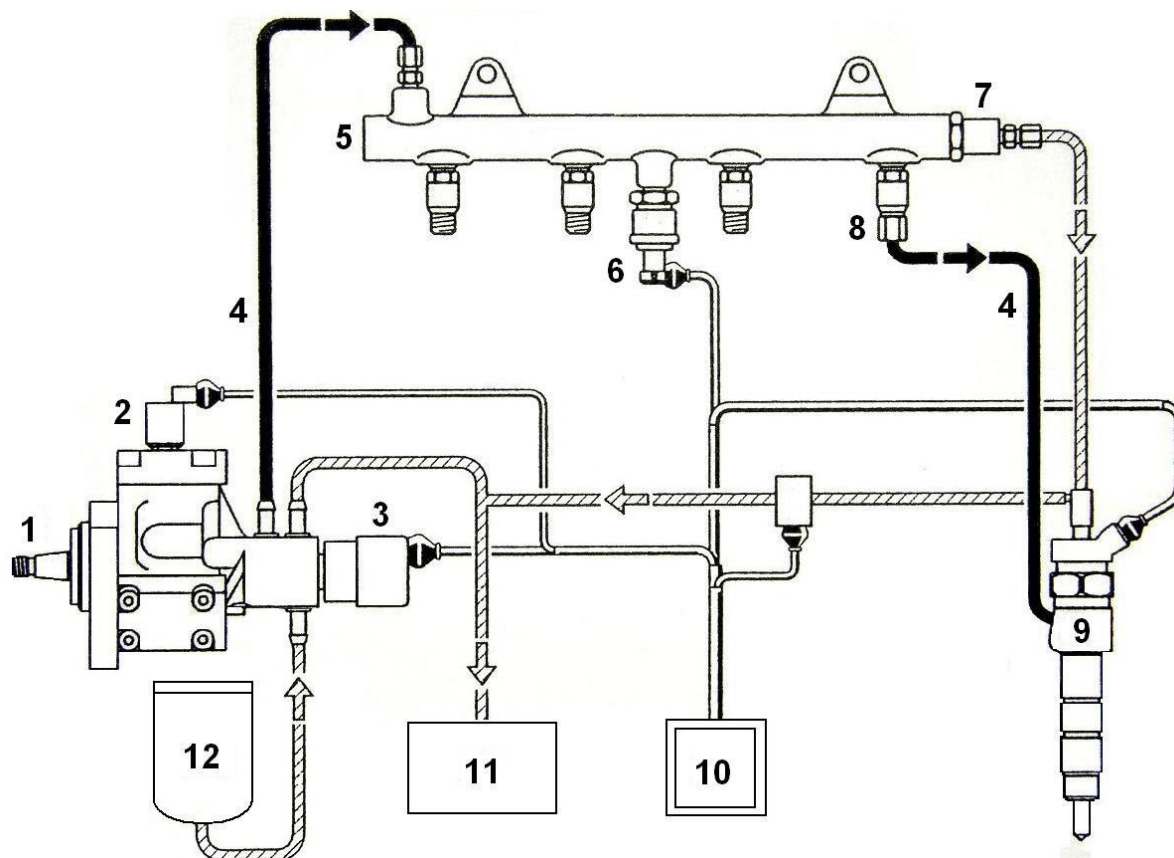
Po dosažení požadované teploty je termostatem topení udržováno na této teplotě. Z důvodu snadnější regulace je výkon topení plynule měnitelný.

5.3.4 Poškození (přehřátí) topných těles

Použitá topná tělesa jsou konstruována pro použití bez vnější teplotní izolace. Maximální provozní teplota těles udávaná výrobcem je 500 °C. Při měřeních korelace mezi teplotou a průtokem vznícení byla teplota často překročena o více než 400 °C. V jednom místě dokonce došlo k přilepení keramické izolační tkaniny, která vydrží teploty do 950 °C. Následkem častého a vysokého teplotního přetěžování došlo k neopravitelné poruše jednoho topného segmentu. Po výměně všech topných těles se již komora nevyhřívala nad 850 °C.

5.4 Palivový systém

Aby průběh vyhoření paliva odpovídal reálným podmínkám v motoru, bude zajištěn palivovým příslušenstvím od firmy BOSCH používaným v moderních vznětových motorech osobních automobilů. Z důvodu zajištění maximální možné flexibility procesu vstřikování byl vybrán vstřikovací systém s tlakovým zásobníkem „Common Rail“. Tento systém odděluje vytváření tlaku od vstřikování. Tlak je vytvářen vysokotlakým třípístkovým čerpadlem nezávisle na vstřikovaném množství. Palivo je v tlakovém zásobníku stlačeno při tlaku 1600 barů na přibližně 80 % svého volného objemu. To zajišťuje potřebný tlak před vstřikovačem nezávisle na tom, v jaké pracovní poloze je v daný okamžik čerpadlo.



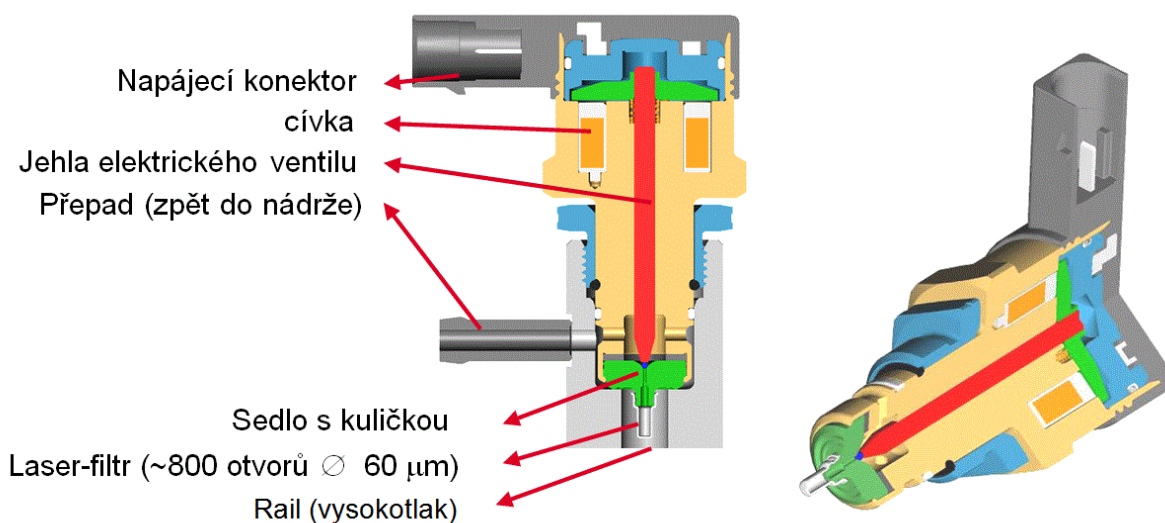
Obrázek 20: Schéma vysokotlaké části palivového systému. [13]

- 1 - Vysokotlaké čerpadlo,
- 2 - odpojovací ventil elementu,
- 3 - tlakový regulační ventil,
- 4 - vysokotlaké potrubí,
- 5 - vysokotlaký zásobník (Rail),
- 6 - snímač tlaku v Railu,
- 7 - pojistný ventil,
- 8 - omezovač průtoku,
- 9 - vstřikovač,
- 10 - řídící jednotka,
- 11 - odpadní nádrž,
- 12 - nádrž s měřeným vzorkem.

Vysokotlaké levotočivé čerpadlo má geometrický objem jednoho pístku $228,96 \text{ mm}^3$. Jeden ze tří pístků je možno elektronicky odpojit a potom může být geometrický objem čerpadla snížen z $686,7 \text{ mm}^3$ na $457,92 \text{ mm}^3$. Odpojením jednoho pístku se sníží hnací moment čerpadla a to vede k úspoře paliva. Potřebný točivý moment k dosažení jmenovitého tlaku tohoto čerpadla (160 MPa) při uvažování mechanické účinnosti 92% je 19 Nm .

Čerpadlo pracuje v rozmezí od 500 do 3000 otáček/min. Celý rozsah tlaků je schopno podávat od 900 otáček/min. Čerpadlo je schopné pracovat s palivy s velkým rozmezím viskozity. Maximální viskozita by neměla překročit viskozitu nafty při $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Minimální viskozita zajišťující dostatečné mazání čerpadla je nižší než hodnota viskozity většiny paliv pro vznětové motory.

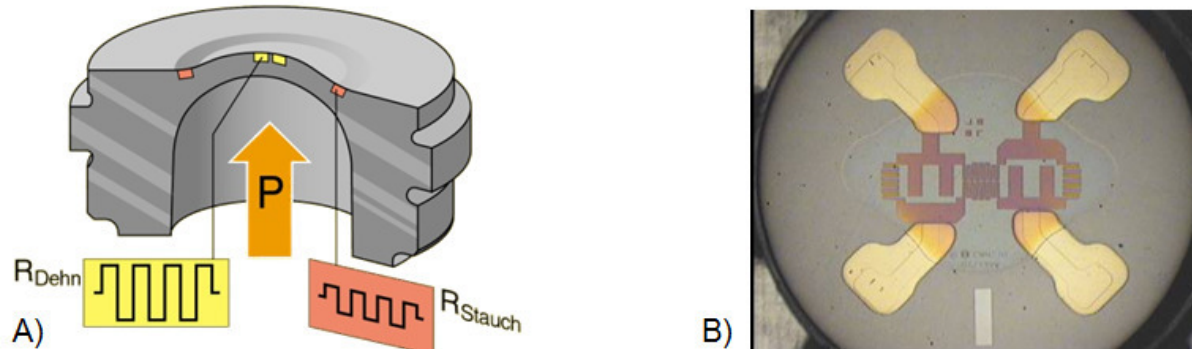
Palivo stlačené na požadovaný tlak je dopraveno vysokotlakým potrubím do zásobníku (railu). Tlak v railu je regulovaný vysokotlakým regulačním ventilem (DRV – Druck Regel Ventil). DRV je trvale napájen PWM signálem v rozmezí napětí 0 až 12 V s frekvencí 1 kHz tak, aby proud nepřekročil hodnotu 1,6 respektive 1,9 A. V žádném případě nesmí být na DRV připojeno konstantní napětí 12 V, protože to by vedlo k nárůstu tlaku a porušení některých spojů vysokotlakého potrubí, nebo v horším případě ke zničení vysokotlakého čerpadla. Není-li na DRV připojen žádný napěťový signál, klade průtok paliva minimální odpor a tlak v zásobníku potom klesne na cca 50 barů. Konstrukce DRV je zobrazena na obrázku (21).



Obrázek 21: Řez vysokotlakým regulátorem (DRV). [13]

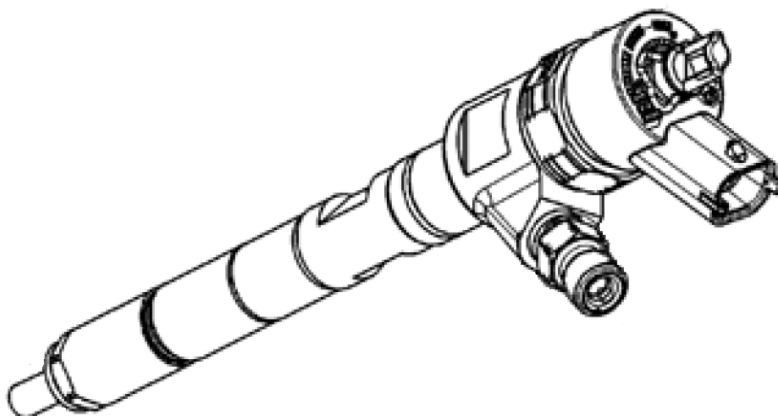
Tlakový zásobník je dále osazen tlakovým čidlem, měřícím v rozsahu 0 až 1800 barů. Závislost výstupního napětí na měřeném tlaku je lineární. Výstupní napětí 0,5 V odpovídá tlaku 0 barů a napětí 4,5 V odpovídá maximálnímu měřitelnému tlaku (u použitého snímače 1800 barů). Není-li výstupní signál v tomto rozmezí, řídicí jednotka detekuje poruchu snímače. Maximální nepřesnost senzoru je 2,5 % v rozsahu teplot od -40 do $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Snímač je znázorněn na obrázku 22. Kovová membrána snímače se působícím tlakem

deformuje a spolu s ní se deformuje i odporový můstek. Vyvážení můstku je vyhodnocováno elektronikou snímače. Signál od tlakového snímače je vyhodnocen v řídicí jednotce, která případnou odchylku od požadovaného tlaku sníží změnou napájení DRV.



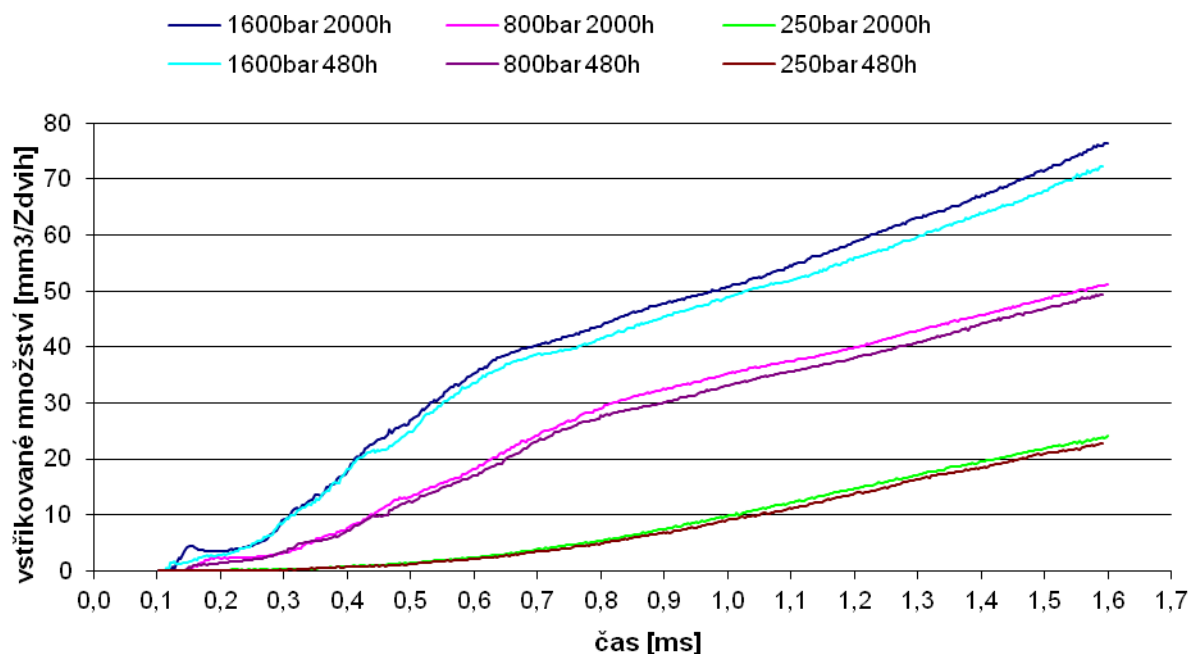
Obrázek 22: Snímač tlaku paliva umístěný na railu. A) Schematické znázornění konstrukce snímače, B) fotografie zvětšeného odporového můstku [13]

Ze zásobníku (railu) je palivo dopravováno do vstřikovače (viz Obrázek 23). Ovládání magnet ventilu probíhá tak, že se nejdříve připojí napětí 48 V na cívku vstřikovače a vyčká se (několik mikrosekund) do doby než proud dosáhne hodnoty 22 A, následně se napětí odpojí a připojí se znovu až po poklesu proudu pod 20 A. Tyto cykly se opakují po dobu 250 μ s. V tu dobu je již kotva přitažena a kulička ventilu umožní odtok řídicí dávky paliva z prostoru nad pístkem řídicí tyčky vstřikovače. Při poklesu tlaku paliva ze zmíněného prostoru je řídicí tyč přestavena a přestává tlačit na jehlu spodního ventilu. Po uplynutí 250 μ s se přivádí napětí podobným způsobem, ale s tím rozdílem, že se hodnota proudu pohybuje mezi 12 a 14 A. Vstřík začíná, v závislosti na tlaku v zásobníku (railu) 140 až 200 μ s po dosažení hodnoty proudu 22 A. Vyšší tlak urychluje přesunutí jehly a tím snižuje dopravní zpoždění. Důležité je, že se vstřikovač chová při jedné hodnotě tlaku vždy stejně. Maximální doporučená doba vstřiku je 2,5 ms (je omezena kvůli možnosti přehřátí cívky).

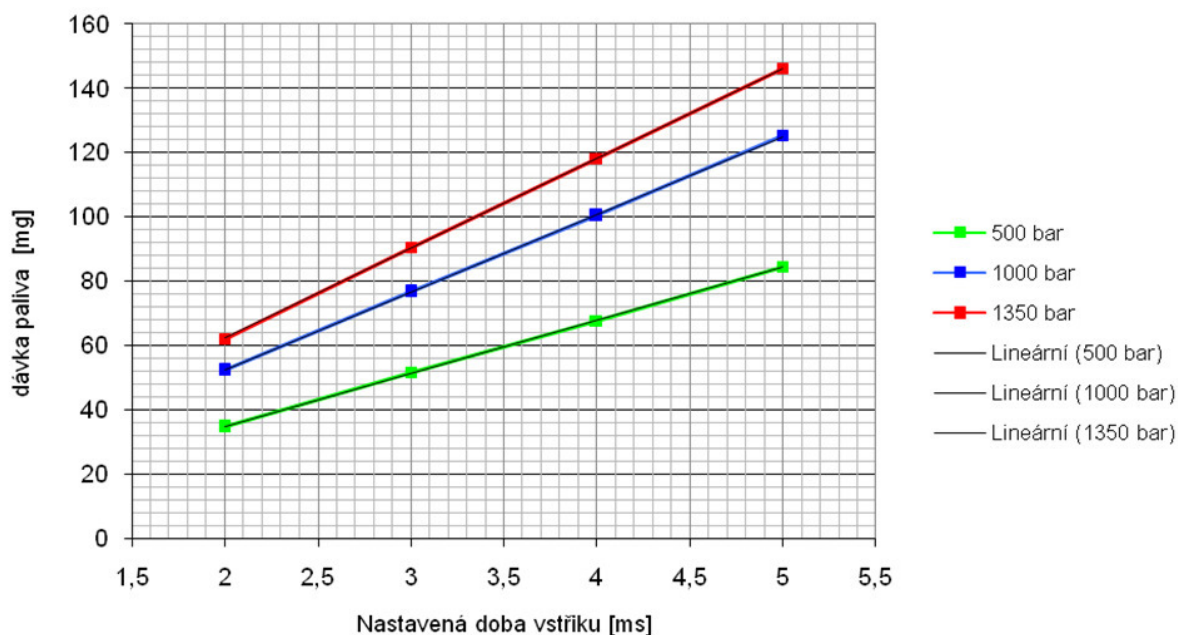


Obrázek 23: Vstřikovač s elektromagnetickým řídicím prvkem pro motory s čtyřventilovou technikou.

Velice důležitou vlastností vstřikovače je jeho časová stabilita. Vstřikovač musí vstřikovat při jedné hodnotě vstupního tlaku vždy stejné množství paliva a vždy ve stejném čase od počátku řídicího signálu. Stálost vlastností tohoto druhu vstřikovače byla ověřena výrobcem (BOSCH). Posunutí naměřených křivek vstřikovaného množství v mm^3/zdvih pro různé tlaky po 480 a 2000 hodinách zkoušky životnosti ukazuje graf 8. Z grafu je vidět, že vstřikovač po 2000 hodinách ($3,3 \times 10^8$ cyklů) vstřikuje nepatrně vyšší dávku. Největší relativní rozdíl je při vstřiku nejmenší možné dávky při vysokém tlaku. Pro účely měření jsou změny parametrů vstřikovače během jeho životnosti zcela zanedbatelné. Změna parametrů musí být zohledněna pouze při výměně vstřikovače, například následkem poruchy. Zařízení by se po té muselo znovu kalibrovat.



Graf 8: Závislost velikosti dávky na době otevíracího el. signálu [14]



Graf 9: Závislost vstřikovaného množství na tlaku a nastavené době vstřiku

Graf 9 zobrazuje na rozdíl od předešlého grafu závislost vstřikované dávky paliva měřenou na univerzitě. Na vodorovné ose není vynesena přesná doba otevíracího elektrického signálu, ale doba vstřiku nastavovaná v záložce nastavení měření programu (kapitola 5.8.2).

5.4.1 Výměna paliva

Palivový systém je sestaven z prvků moderního systému „Common rail“ a to s sebou přináší větší složitost výměny paliva a také větší množství vzorku, než jaké je potřebné u zařízení používajících k vytvoření tlaku pneumatický multiplikátor.

Popis jednotlivých úkonů při výměně paliva

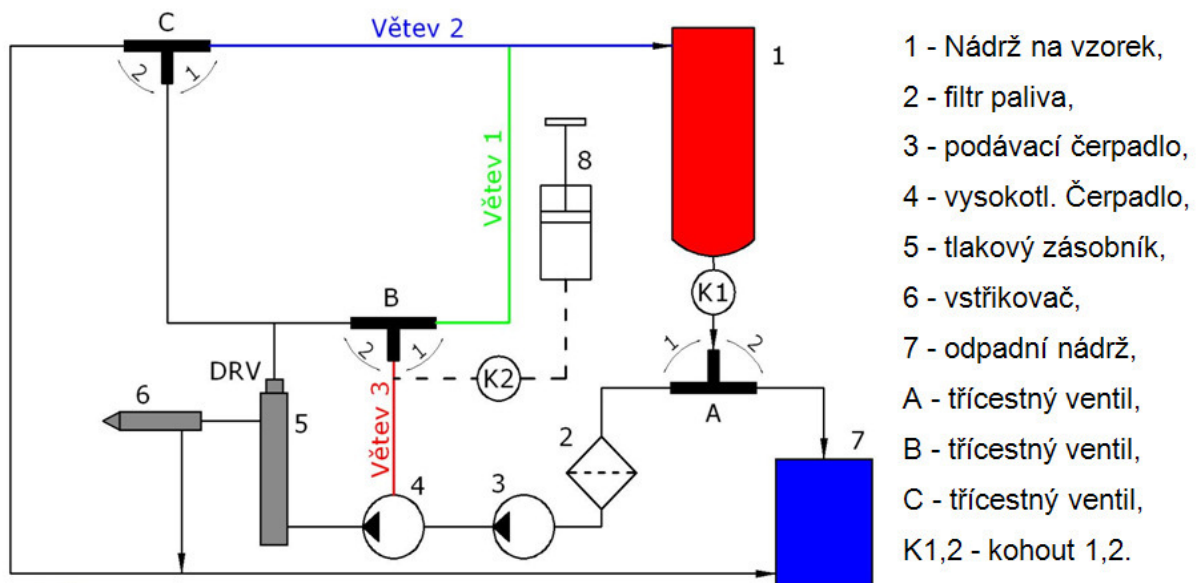
1 - Vypuštění starého paliva:

- vypnutí obou čerpadel,
- ventil A do polohy 2,
- kohout A a B otevřít,
- ventil B a C do polohy 1,
- profouknout větev 1 vzduchem,
- ventil B do polohy 2,
- profouknout větev 2 vzduchem.

2 - Proplach starého paliva:

- uzavření kohoutů A a B,
- ventil A do polohy 1,
- ventil B a C do polohy 2,
- důkladné vytření nádrže na vzorek a její naplnění novým vzorkem (1 litr),
- otevření kohoutu A,
- zapnutí podávacího čerpadla (vysokotlaké je stále vypnuté),
- propláchnutí větve 3 novým palivem (2 dl),
- ventil B do polohy 1,
- spuštění vysokotlakého čerpadla (na DRV ventil není přivedeno žádné napětí),
- propláchnutí railu (3 dl),
- přepnutí ventilu C do polohy 1,
- nastavení DRV ventilu na vstřikovací tlak (více než 300 bar),
- propláchnutí vysokotlakého potrubí mezi railem a vstřikovačem vystříkáním paliva (1 dl) mimo spalovací komoru. V tomto kroku je nutné demontovat uchycení vstřikovače a následně pomocí lineárního vedení odsunout vysokotlakou komoru směrem doleva o takovou vzdálenost, aby bylo možné mezi komoru a vstřikovač umístit přípravek (hliníkový sběrač) na zachycení vystříkaného paliva.

V průběhu měření a zvláště při výměně paliva se musí kontrolovat, jestli z důvodu netěsnosti nebo nastavení špatné polohy některého z ventilů, nedošlo k vyprázdnění nádrže se vzorkem, čímž by se mohlo poškodit naprázdno běžící vysokotlaké čerpadlo. Při provozu čerpadel musí být kohout „A“ vždy otevřen a vysokotlaké čerpadlo nesmí být nikdy zapnuto při vypnutém podávacím čerpadle a prázdné nádrži na vzorek.



Obrázek 24: Schéma palivového systému.

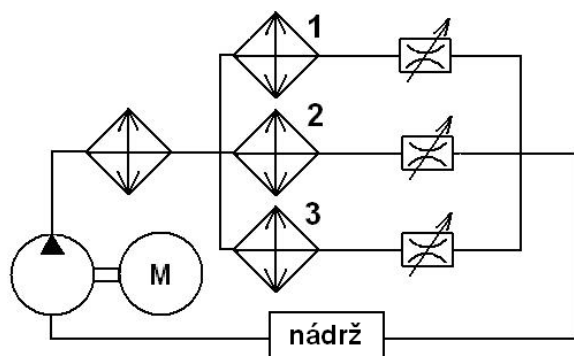
5.4.2 Návrh inovace palivového systému

Přes velkou variabilitu současného palivového systému, existují dvě nevýhody tohoto systému. Jednou z nich je nutnost velkého objemu vzorku paliva, který je potřebný k dokonalému vypláchnutí všech jeho součástí. Druhou nevýhodou jsou určité požadavky na mazací vlastnosti paliva, které zaručí mazání nízkotlakého a zvláště vysokotlakého čerpadla. Při zjišťování OCC paliv pro vznětové motory se sice předpokládají určité mazací vlastnosti, ale zařízení může být použito i pro testování OCC různých příměsí. Oba tyto nedostatky palivového systému se dají odstranit oddělením vzorku paliva od zbytku palivového systému. K výměně paliva by potom docházelo pouze ve vysokotlaké části mezi zásobníkem paliva a vstřikovačem. Toho by se dalo docílit zařazením vysokotlakého válce s pístkem, oddělujícím stálou náplň od měřeného vzorku. Měřený vzorek paliva by tak byl oddělen od části systému, jejímž úkolem by bylo pouze vytvářet a regulovat vstřikovací tlak. Množství testovaného paliva by bylo možné tímto oddělením zredukovat na přibližně 100 ml. Současný stav je však takový, že se musí vyměnit celá palivová náplň včetně nízkotlakých větví. Celkový objem palivové soustavy je cca 130 ml.

5.5 Chladicí systém

Některé části komory obsahují prvky, které nemohou být vystaveny vysoké teplotě, a proto jsou chlazeny vodou. Konkrétně se jedná o vstupní čelo komory, které je chlazeno pomocí mosazné vložky vstřikovače. V této části je kromě vstřikovače paliva umístěn

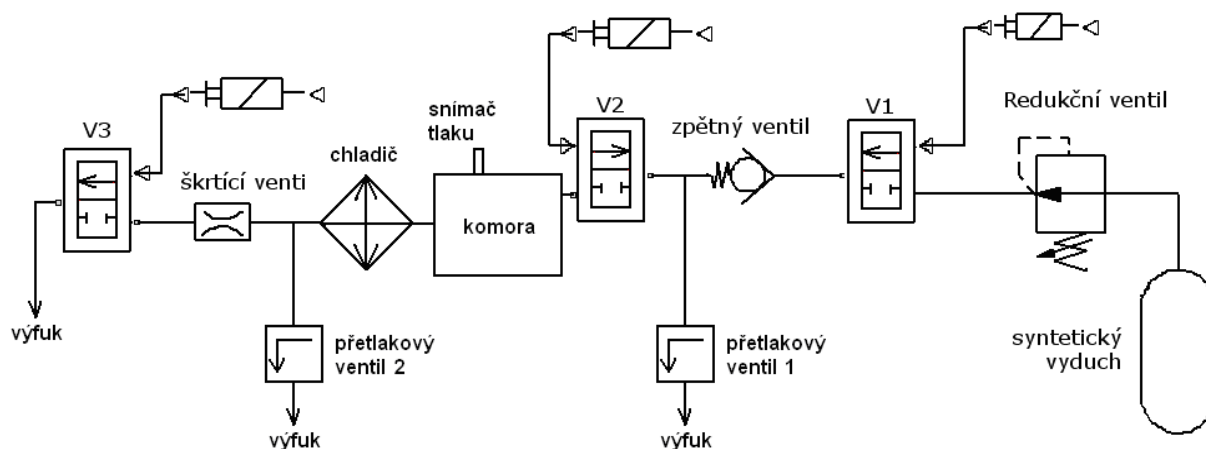
piezoelektrický snímač tlaku a vstup endoskopu. Dále je vodou chlazena část výstupního čela a odvod spalin kvůli ochraně ventilů. Topenářské čerpadlo zajišťuje nucenou cirkulaci vody z rezervoáru výměníkem voda/vzduch do jednotlivých chlazených partií komory. Průtok jednotlivými částmi je možné regulovat pomocí škrcení.



1 – Chladič vstupního čela,
2 – chladič výstupního čela,
3 – chladič spalin.
Schéma chladicího okruhu.

Obrázek 25: Schéma chladicího okruhu.

5.6 Vzduchový systém



Obrázek 26: Schéma vzduchového systému.

V1, V2, V3: ventil 0255 Bürkert (DN=1 mm, tlak 0 -100 bar, médium je vzduch, těsnění PTFE, napětí 12 V/ DC, maximální teploty do 250 °C).

Přetlakový ventil 1: udržuje požadovaný tlak v komoře před vstřikem paliva.

Přetlakový ventil 2: má pojistnou funkci, chrání komoru před příliš vysokým tlakem.

Vzduchový systém má za úkol tyto tři úkony:

1. Proplachování čerstvým vzduchem: při otevření ventilů V1, V2 a V3 se komora vypláchne čerstvým syntetickým vzduchem.

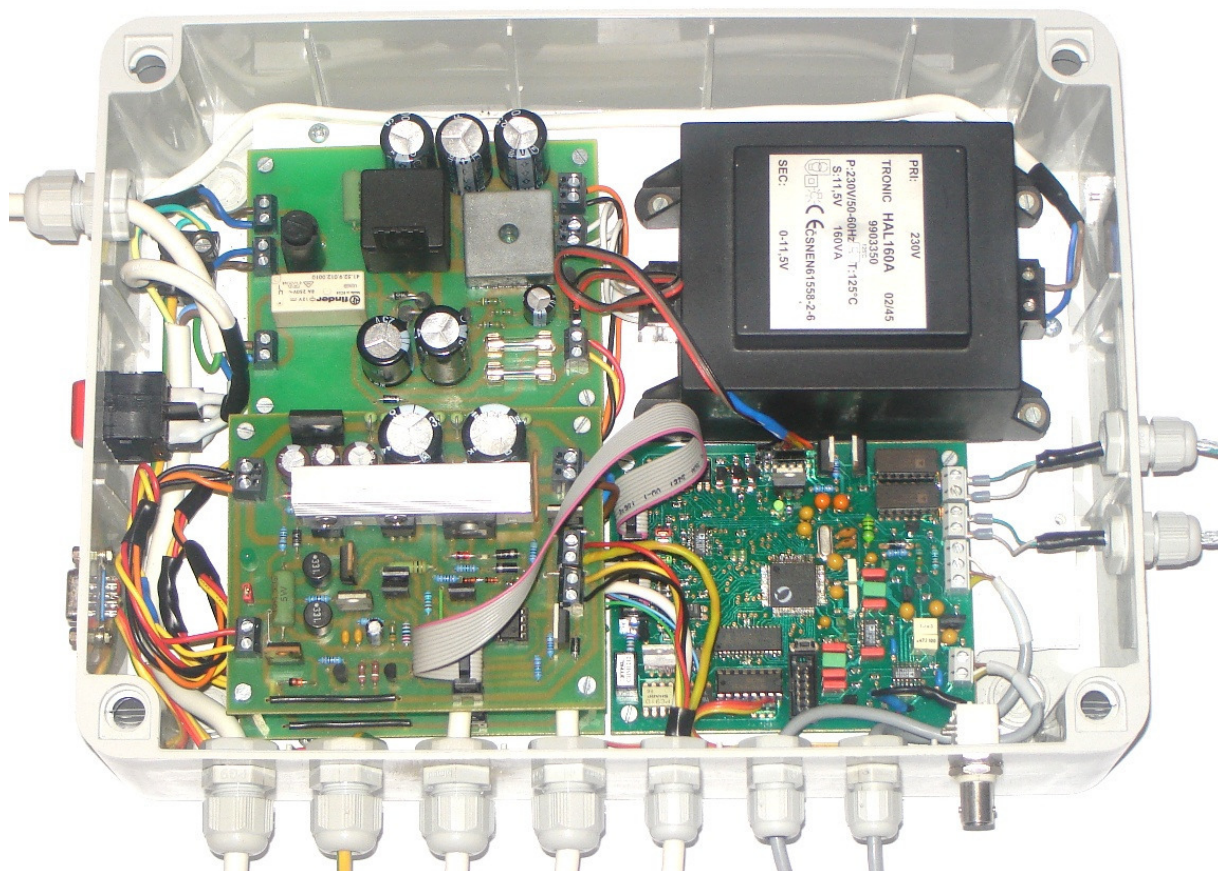
2. Plnění čerstvým vzduchem: uzavřením ventilu V3 se zvýší tlak v komoře na hodnotu nastavenou na redukčním ventilu tlakové láhve (například 15 barů). Protože je komora již vyhřátá na požadovanou teplotu, zvýší se tlak až na hodnotu nastavenou na přetlakovém ventilu V1 (požadovaná hodnota při vstřiku paliva). Vzduch se ohřívá až na požadovanou teplotu při vstřiku. Při dosažení této teploty řídící jednotka zavře ventil V2 (maximální doba uzavření je 30 ms). Ihned po uzavření V2 řídící jednotka zahájí vstřik měřeného paliva.

3. Vypuštění spalin: tlak v komoře nepřesáhne hodnotu tlaku nastavenou na přetlakovém ventilu V2 (například 60 barů). Zbytek spalin se vypustí otevřením ventilu V3 do výfuku. Spaliny projdou z komory nejdříve chladičem voda vzduch, aby nepoškodily vysokou teplotou ventil V3.

5.7 Systém řízení a sběru dat

Nezbytnou součástí zařízení jsou elektronické jednotky, které navrhl a vyrobil Ing. Tomáš Zvolský v rámci své diplomové práce. V původní koncepci zařízení bylo uvažováno o vyhodnocení OCC podobným systémem, jaký používá IQT společnosti AET, tedy z průběhu tlaku v komoře a z průběhu zdvihu jehly vstřikovače. V průběhu vývoje se však ukázalo vhodnější využít kanál pro snímání zdvihu jehly ke snímání průběhu tlaku druhým piezoelektrickým snímačem tlaku. Další změnou bylo rozšíření elektronické jednotky o ovládání elektromagnetického vstřikovače paliva, včetně úpravy příslušného programu.

Elektronická řídící jednotka se skládá celkem ze čtyř desek tištěných spojů (Obrázek 27). Elektronický systém zařízení je možné rozdělit na část pro řízení a část pro měření a sběr dat.



Obrázek 27: Elektronická řídicí jednotka [35].

5.7.1 Základní Parametry řídicí jednotky [35]

Měřené kanály:

- 2x průběh tlaku uvnitř komory piezoelektrickými snímači,
- 1x tlak na počátku vstřiku paliva,
- 2 x měření teploty termočlánkem,
- 4 x možnost připojení analogového vstupu.

Akční prvky:

- 3x pneumatický ventil (V1, V2 a V3),
- 1x vstřikovač paliva,
- 2 x topná tělesa.

Vzorkovací frekvence dvou kanálů tlaku je 1 MHz při využití maximální rychlosti A/D převodníku. V 16-ti bitovém rozlišení je díky použité 128 kB paměti jednotka schopna

zaznamenat až 32 ms záznamu. V základním nastavení je doba měření zkrácena na 8 ms, což je hodnota dostatečná i pro měření paliv s velmi nízkým OCČ.

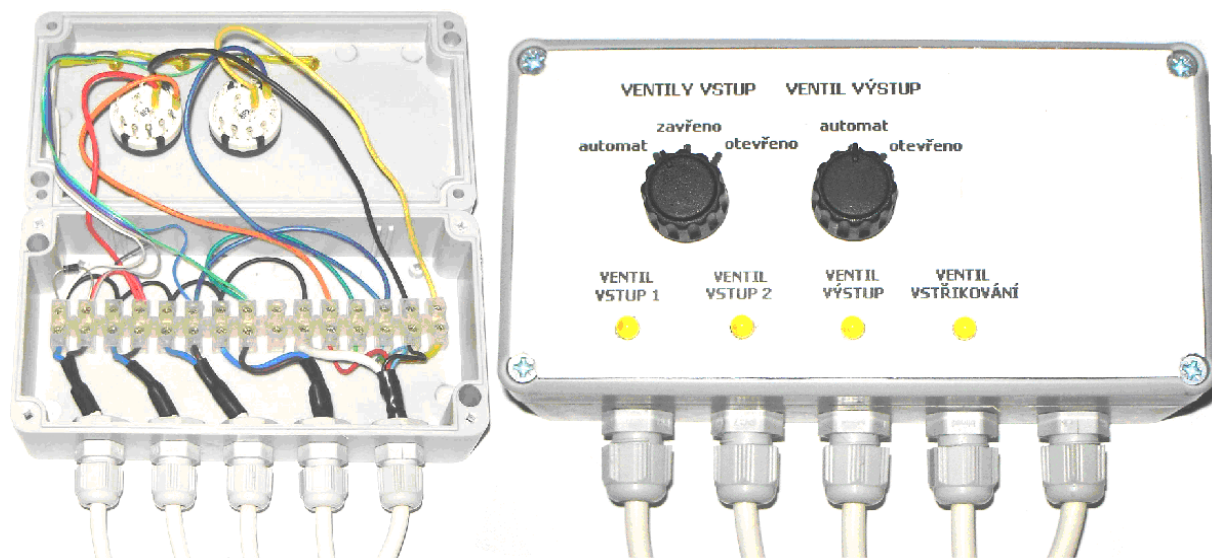
Protože použité rychlé piezoelektrické snímače tlaku nejsou vhodné pro měření pomalých změn tlaku, je jednotka vybavena snímačem tlaku pro měření pomalých změn, respektive počátečního tlaku náplně před vstřikem paliva. Tento snímač je kvůli nízkému rozsahu oddělen od komory ventilem V1 (viz Obrázek 26).

Řídicí jednotka umožňuje kromě dvou kanálů pro měření tlaku zaznamenávat ještě dva kanály teploty pro měření teploty stěny komory a teploty náplně v blízkosti vstřikovače. K měření těchto teplot jsou použity termočlánky typu K (NiCr-NiAl). Měřicí rozsah teplotních kanálů je díky digitální hodnotě A/D převodníku zvolen na 0 °C až 1023 °C.

Pro napájení cívky ventilu vstřikovače je přivedeno napětí 95 V z předem nabitých kondenzátorů. Při nastavení vstřikovacího tlaku na 1000 bar probíhá vstřikování paliva přibližně 1300 μ s.

K jednotce je dále připojen panel ručního ovládání ventilů (viz Obrázek 28), který umožňuje obsluhu ručně ovládat pneumatické ventily a současně kontrolovat jejich polohu, a to i případně přepnutí do automatického režimu.

Pro přenos dat mezi řídicí jednotkou a počítačem byla zvolena sériová komunikace, jednotka je vybavena vícesignálovou napětím řízenou sběrnici RS-232.



Obrázek 28: Panel ručního ovládání ventilů. [35]

5.7.2 Použité snímače

Piezo snímač tlaku:

- označení: QC43D,
- citlivost: 68 pC /bar,
- rozsah: 0-200 bar,
- linearita: 0,2 % z rozsahu,
- výrobce: AVL.



Snímač tlaku náplně na počátku vstříku:

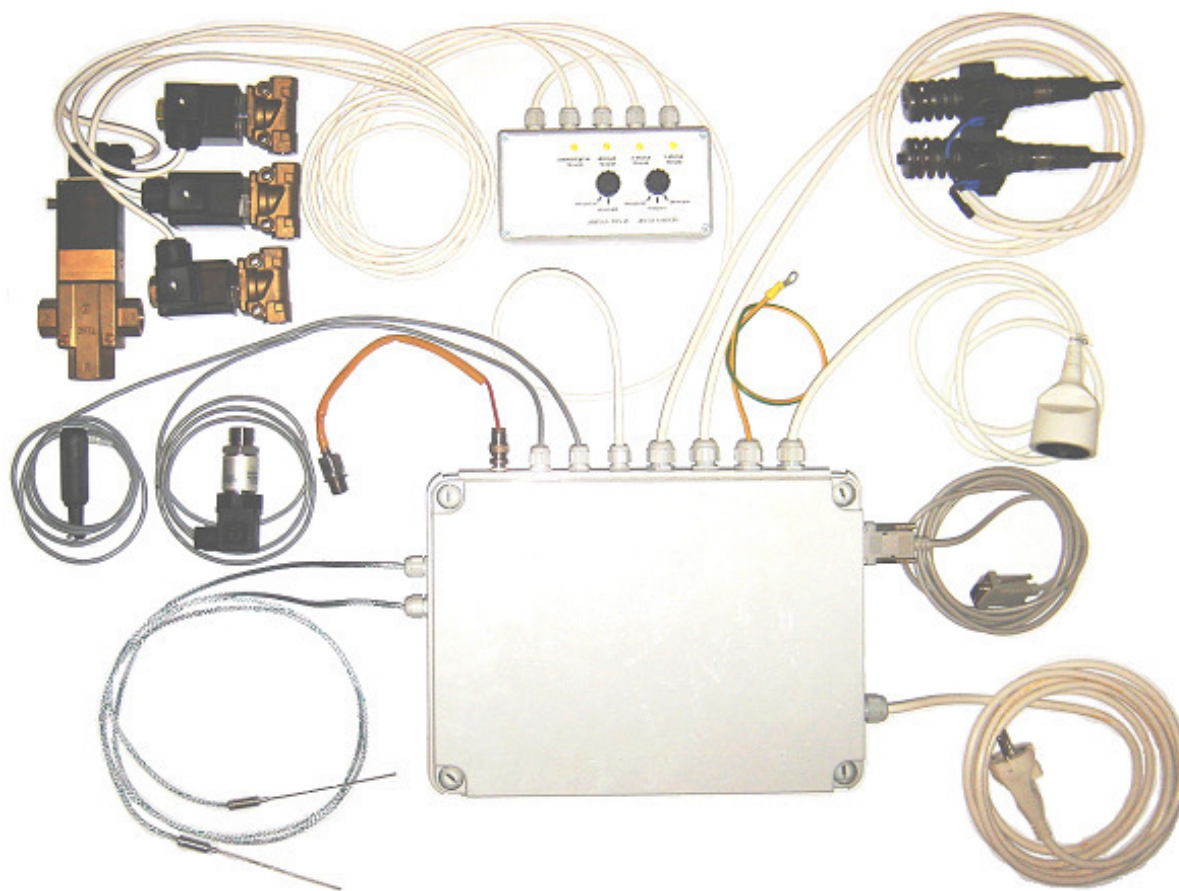
- označení: DMP 331,
- rozsah: 0-25 bar,
- linearita: 0,25 % z rozsahu,
- výrobce: BD SENSORS.



Termočlánky:

- označení: Snímač teploty termoelektrický,
- bez ochranné armatury – 312,
- typ termočlánku: "K" NiCr-NiAL,
- měřicí konec: izolovaný,
- toleranční třída: 2.





Obrázek 29: Celkové zapojení řídicí jednotky včetně snímačů a ovládaných prvků. [35]

5.8 Software

5.8.1 Program mikrokontroléru [35]

„Pro funkci mikrokontroléru bylo nutné vytvořit program. Program byl napsán v jazyce assembler a velikostně má něco přes 6 kB.

Po zapnutí řídicí jednotky, nebo po resetu mikrokontroléru, se nastaví výchozí stavy mikrokontroléru, vynuluje se obsah paměti a načte se do ní obsah EEPROM. Jestliže je řídicí jednotka propojena s počítačem, měří veškeré analogové signály (teploty, tlaky, napětí) a ty společně s některými stavovými signály posílá po sériové lince do počítače. Pro zvýšení přesnosti je každá analogová veličina změřena vícekrát a následně zprůměrována.

Při zapnutí měření cetanového čísla program mikrokontroléru řídí průběh otevírání a zavírání ventilů a zapíná nebo vypíná topení spalovací komory v přesném časovém sledu. Nejprve se spalovací komora pročistí stlačeným vzduchem, poté se naplní a zapne se topení spalovací komory. Když teplota vzduchu ve spalovací komoře dosáhne potřebné teploty

pro měření, zavřou se ventily pro vpouštění vzduchu do spalovací komory a pomocí vstřikovacího zařízení se do této komory vstříkne potřebná dávka měřeného paliva. Po vstříknutí paliva dojde ke vznícení směsi a změří se průběh tlaku a zdvihu jehly vstřikovače. Po změření průběhu těchto dvou veličin dojde k vypuštění spálené směsi ze spalovací komory. Následně se změřená data pošlou do počítače, kde se změří doba průtahu a následně spočítá velikost cetanového čísla. Od tohoto okamžiku je řídicí jednotka připravena pro další měření cetanového čísla.

Pokud dojde kdykoliv během programu k přerušení komunikace řídicí jednotky s počítačem, ukončí program automaticky veškerá měření a uvede celé zařízení do výchozího stavu. Tím se zamezí nekontrolovanému chodu při měření.

Případnou změnu programu mikrokontroléru lze provést přes rozhraní JTAG.“[35].

5.8.2 Program pro počítač [35]

„Pro komunikaci řídicí jednotky s počítačem byl vytvořen program. Hlavním účelem programu je zobrazit změřený průběh zdvihu jehly vstřikovače a tlaku ve spalovací komoře, stanovit dobu průtahu vznícení a vypočítat hodnotu cetanového čísla. Program umožňuje zobrazit další měřené veličiny a pomocí něj se také zadávají některé parametry potřebné pro změření cetanového čísla. Komunikace počítače s řídicí jednotkou probíhá přes sériové rozhraní RS232.

Pro přehledné zobrazení jednotlivých údajů je program rozdělen do čtyř panelů. Z hlediska použití jednotky (měření cetanového čísla) je nejdůležitější panel „Hlavní“. Po připojení řídicí jednotky k počítači a její zapnutí se zobrazí v horní části tohoto panelu nápis „Jednotka připojena“. Nezáleží na pořadí spuštění řídicí jednotky a programu. Dále se čtyřikrát za sekundu periodicky zobrazují aktuální změřené údaje teploty vzduchu ve spalovací komoře, teploty stěny válce spalovací komory a tlaku vzduchu v přívodním potrubí spalovací komory. Před měřením cetanového čísla musejí být nastaveny údaje pro vstřik paliva umístěné na panelu „Nastavení a data“ (popsáno níže). Dále se musí nastavit konečná teplota vzduchu pro měření, požadovaná teplota stěny komory a délka měření průběhu tlaku a zdvihu jehly. Po nastavení těchto údajů se spustí měření cetanového čísla stisknutím tlačítka START. Řídicí jednotka pročistí spalovací komoru vzduchem, poté se komora stlačeným vzduchem naplní a zapne se topné těleso pro ohřev vzduchu. Tím začne teplota vzduchu ve spalovací komoře stoupat a když dosáhne předem nastavené teploty pro měření, dojde k uzavření komory, ke vstříknutí paliva a změření průběhu zdvihu jehly vstřikovače a tlaku ve spalovací komoře. Naměřené údaje se krátce poté zobrazí v grafu (rovněž umístěn na panelu „Hlavní“) a stanoví se z nich doba průtahu vznícení paliva. Z této

doby průtahu se určí výsledná hodnota cetanového čísla, která se zobrazí v dolní části panelu „Hlavní“. Měření další hodnoty cetanového čísla se spustí opět stisknutím tlačítka START. Po stisknutí tohoto tlačítka se změní v tlačítko STOP a lze jím kdykoliv měření ukončit. Měření se rovněž ukončí, dojde-li k přerušení komunikace mezi řídicí jednotkou a počítačem.

V panelu „Nastavení a data“ se nastavují především časové údaje pro vstřikování, konstanty čidla tlaku a čidla zdvihu jehly. Lze tam také měnit časovou konstantu obvodů pro měření piezoelektrickým čidlem a zapínat automatickou kompenzaci těchto obvodů. Na tomto panelu se vybírá komunikační port a zobrazují se údaje o délce provozu jednotky.

V panelech „Grafy1“ a „Grafy2“ jsou zobrazeny časové průběhy veličin změřených řídicí jednotkou. Perioda měření je 0,25 s.“[35].

V panelu „Grafy1“ jde o veličiny:

- hodnota převodníku zdvihu jehly vstřikovače,
- hodnota převodníku piezoelektrického snímače tlaku,
- tlak v přívodním potrubí spalovací komory,
- teplota vzduchu ve spalovací komoře,
- teplota stěny spalovací komory.

V panelu „Grafy2“ jde o veličiny:

- napájecí napětí digitální části jednotky 3,3 V,
- napájecí napětí analogové části jednotky 3,3 V,
- referenční napětí jednotky 2,2 V,
- napětí stabilizované sítě 12 V,
- napětí nestabilizované sítě 15 V,
- teplota mikrokontroléru.

6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Výsledná funkce nového zařízení, při jehož stavbě bylo využito mnoha nezcela ověřených řešení, se nedá ověřit jinak než experimentálně. Mnoho z těchto experimentů nebylo navrženo za účelem objasnění závislosti mezi průběhem tlaku a hodnotou OCČ, ale k porozumění a popsání technických vlastností a možností nového zařízení.

Příklady provedených „nestandardních“ testů:

- test průběhu tlaku měřeného na vzdálenějším čele komory,
- určení doby počátku vstřiku za pomoci vysokorychlostní kamery,
- vizualizace průběhu hoření vysokorychlostní kamerou,
- konfrontace měřeného průběhu tlaku s průběhem vypočteným v programu Fluent,
- testování vlivu nastavené doby vstřiku a hodnoty vstřikovacího tlaku na vstřikovaném množství,
- testování vlivu průtahu vznícení při nastavení maximálního výkonu topných těles,
- testování maximální dosažitelné teploty pláště komory a náplně,
- testování při různých plnicích tlacích,
- a mnohé další experimenty.

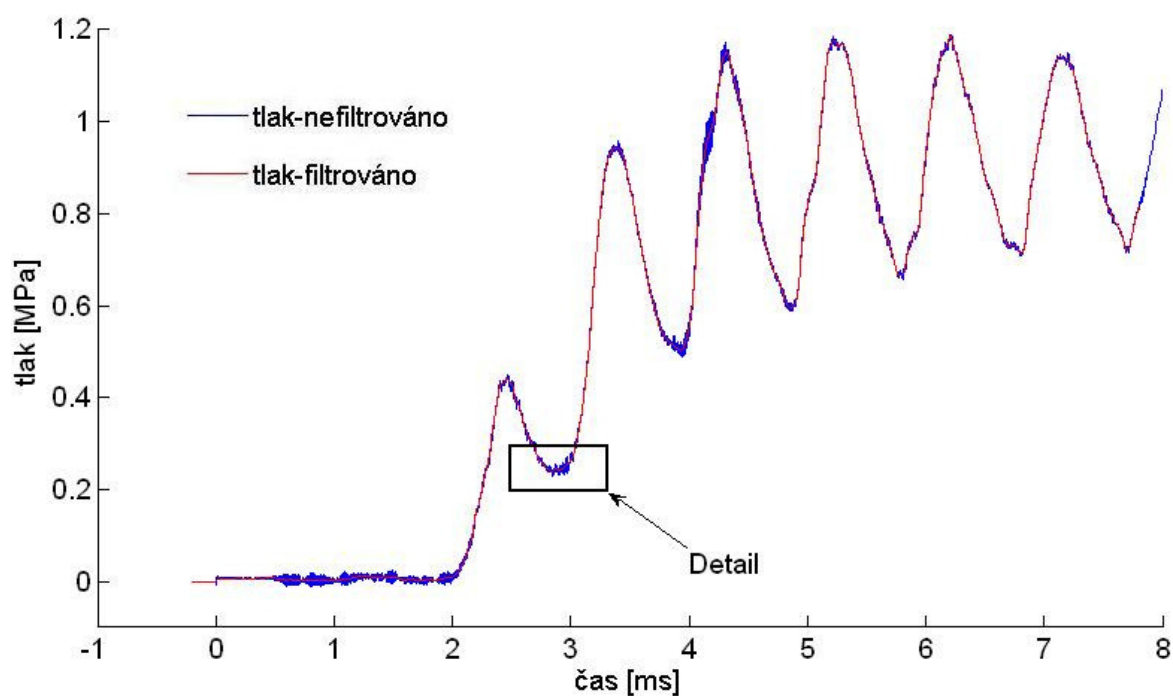
Podrobný popis všech nestandardních experimentů by zaplnil příliš mnoho stran a čtenáři možná přinesl více otázek, než odpovědí a proto je tato kapitola věnována pouze zpracování signálu, konfrontaci měřeného průběhu s výpočtem a experimentům provedeným s vysokorychlostní kamerou.

6.1 Zpracování získaného průběhu tlaku

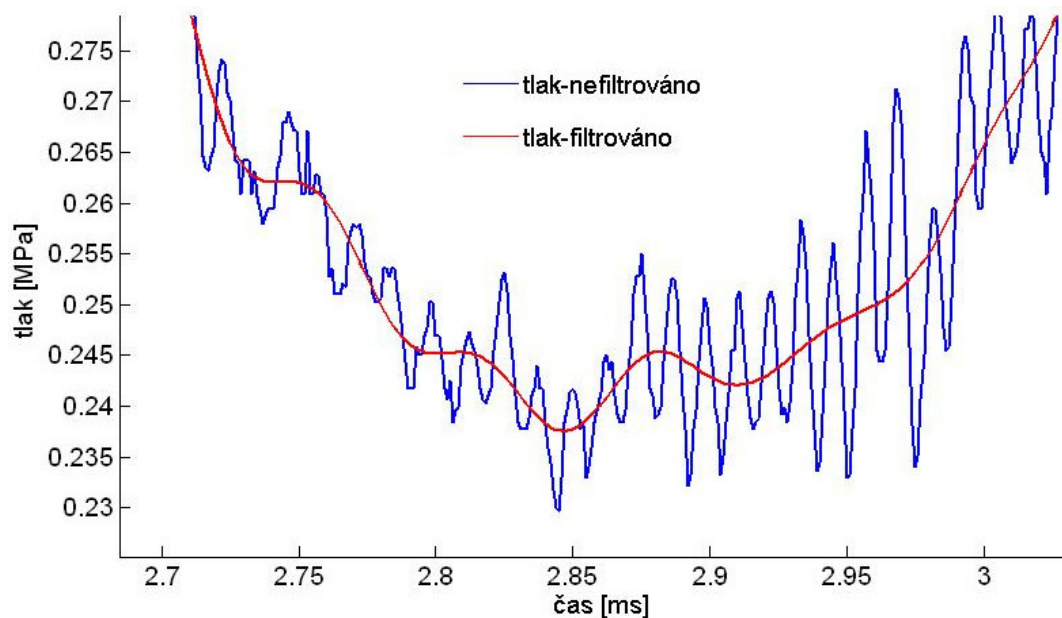
6.1.1 Filtrace

Přes to, že je před A/D převodník pro snímání tlaku zařazen antialiasingový filtr s dolní propustí s limitní frekvencí 100 kHz, objevuje se v zobrazeném průběhu tlaku šum. Tento šum může být zapříčiněn vlastní frekvencí použitého snímače, která je 85 kHz. Kromě vlivu vlastní frekvence se může na vzniklém šumu podílet také elektrický drift zapříčiněný prudkým nárůstem a poklesem proudu ovládačícího kotvu elektromagnetického ventilu vstřikovače (až 20 A při napětí 90 V). Další příčinou zvýšeného šumu může být citlivost na zrychlení snímače. Vyšší intenzita šumu v počáteční oblasti koresponduje s dobou otevření a uzavření elektromagnetického ventilu vstřikovače. Tomuto zjištění předcházela řada pokusů

s různou dobou počátku a konce vstřiku.

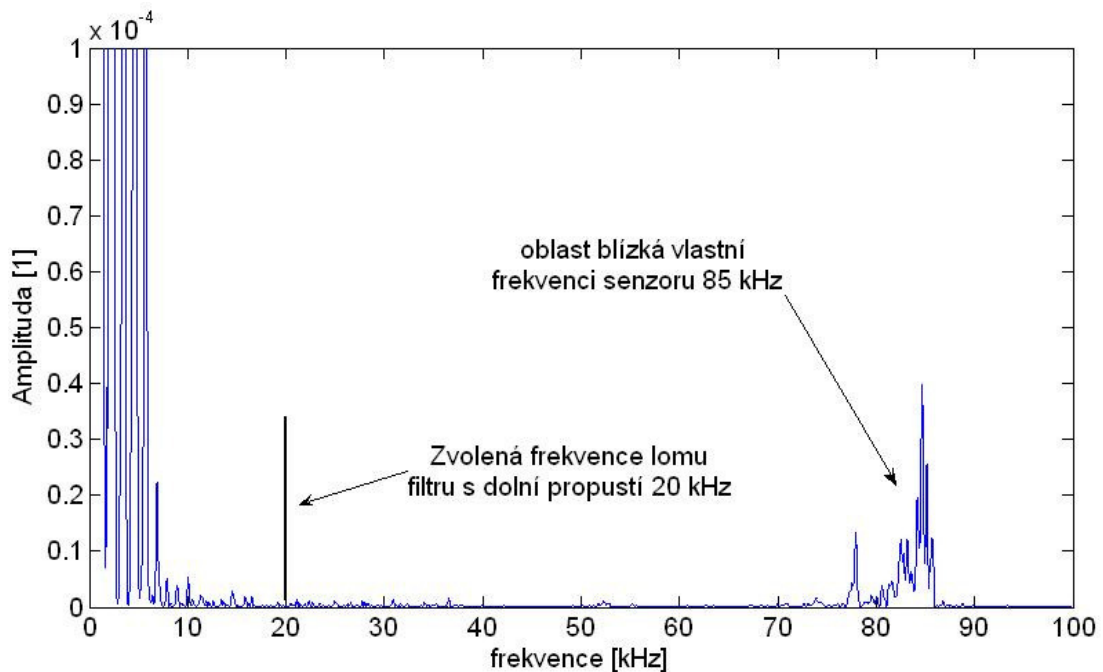


Obrázek 30: Příklad naměřeného průběhu tlaku.



Obrázek 31: Detail naměřeného průběhu tlaku.

Volba mezní frekvence filtru s dolní propustí byla provedena na základě FFT transformace (Fast Furier Transform), která převedla průběh tlaku z časové do frekvenční oblasti. Graf 9 zobrazuje zvýšené hodnoty amplitud v okolí vlastní frekvence senzoru.

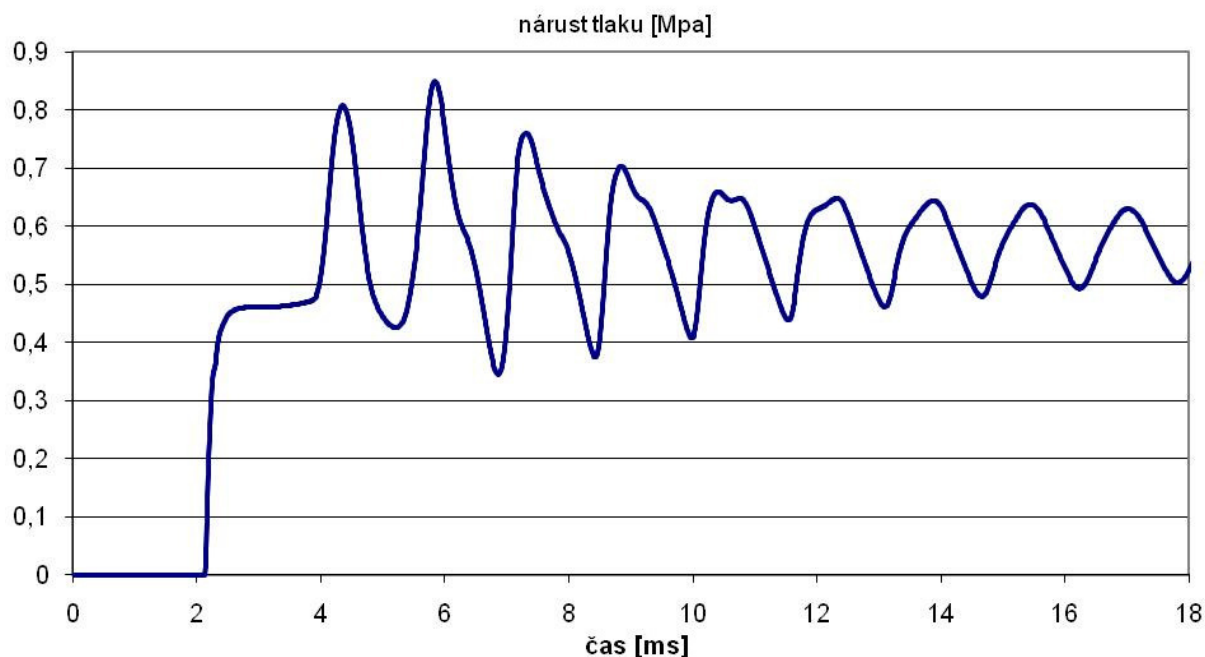


Graf 9: Výsledek FFT.

6.1.2 Konfrontace naměřeného průběhu tlaku s modelem vytvořeným v programu Fluent

Podnětem vzniku této podkapitoly byly diskuze okolo průběhu naměřeného tlaku, který připadal několika kolegům nereálný a přičítali naměřené tlakové vlny jiným veličinám, například elektrickým. Model měl tedy pouze ověřit vznik tlakových vln, dosažení 100% shody s naměřeným průběhem tlaku nebylo cílem tvorby modelu. Model tedy obsahoval řadu zjednodušení, jako například:

- vnitřní geometrie spalovací komory byla nahrazena válcem stejné délky a průměru,
- teplota náplně na počátku vstřiku paliva byla v celém objemu 800 K,
- rychlost uvolňování tepla byla počítána podle Wiebeho charakteristické rovnice s parametrem hoření $m = 0,4$,
- celkové přivedené teplo bylo 4420 J.



Obrázek 32: Průběh vypočteného tlaku v programu Fluent. [15]

Průběh vypočteného tlaku od tlaku naměřeného se odlišuje poměrně významně hlavně ve frekvenci tlakových vln a jejich větším útlumu. I přes značná zjednodušení modelu je ale možné najít mezi průběhy tlaků jistou podobnost.

Okrajové podmínky modelu [15] byly stanoveny na základě technických parametrů spalovací komory a naměřeného množství vstříknutého paliva. Nejvýznamnější rozdíl mezi naměřeným a vypočteným průběhem tlaku je patrný na počátku nárůstu tlaku. U vypočteného průběhu tlaku nedochází po prvním rychlém nárůstu tlaku (na hodnotu přibližně 0,45 MPa) k žádnému poklesu tlaku v místě měření. Je patrná pouze prodleva před dalším nárůstem tlaku (přibližně 1,75 ms). Na rozdíl od toho u naměřených průběhů tlaku dochází vždy po prvním nárůstu tlaku k jeho poklesu a následnému nárůstu. Příčinou je pravděpodobně rozdílný průběh uvolňování tepla. Výpočtový model počítá s rychlostí uvolňování tepla podle Wiebeho charakteristické rovnice uvažující konstantní parametr hoření $m = 0,4$. Ve skutečnosti však zřejmě dochází k uvolňování tepla ve dvou kvalitativně a kvantitativně odlišných fázích, počátečního kinetického a postupného difúzního hoření. Počátek obou fází je však totožný, výsledný průběh hoření je součtem obou těchto fází [9]. Pokles naměřeného tlaku je možné vysvětlit tak, že po rychlém přívodu tepla v kinetické části hoření dochází k pohybu části náplně komory směrem od vstřikovače a při následném prudkém poklesu rychlosti hoření (konec kinetické fáze) způsobuje tento pohyb pokles tlaku v místě měření. Vliv pohybu náplně na průběh tlaku je patrný i v případě výpočtového modelu, zde však díky absenci prudkého snížení rychlosti hoření nedochází k poklesu tlaku,

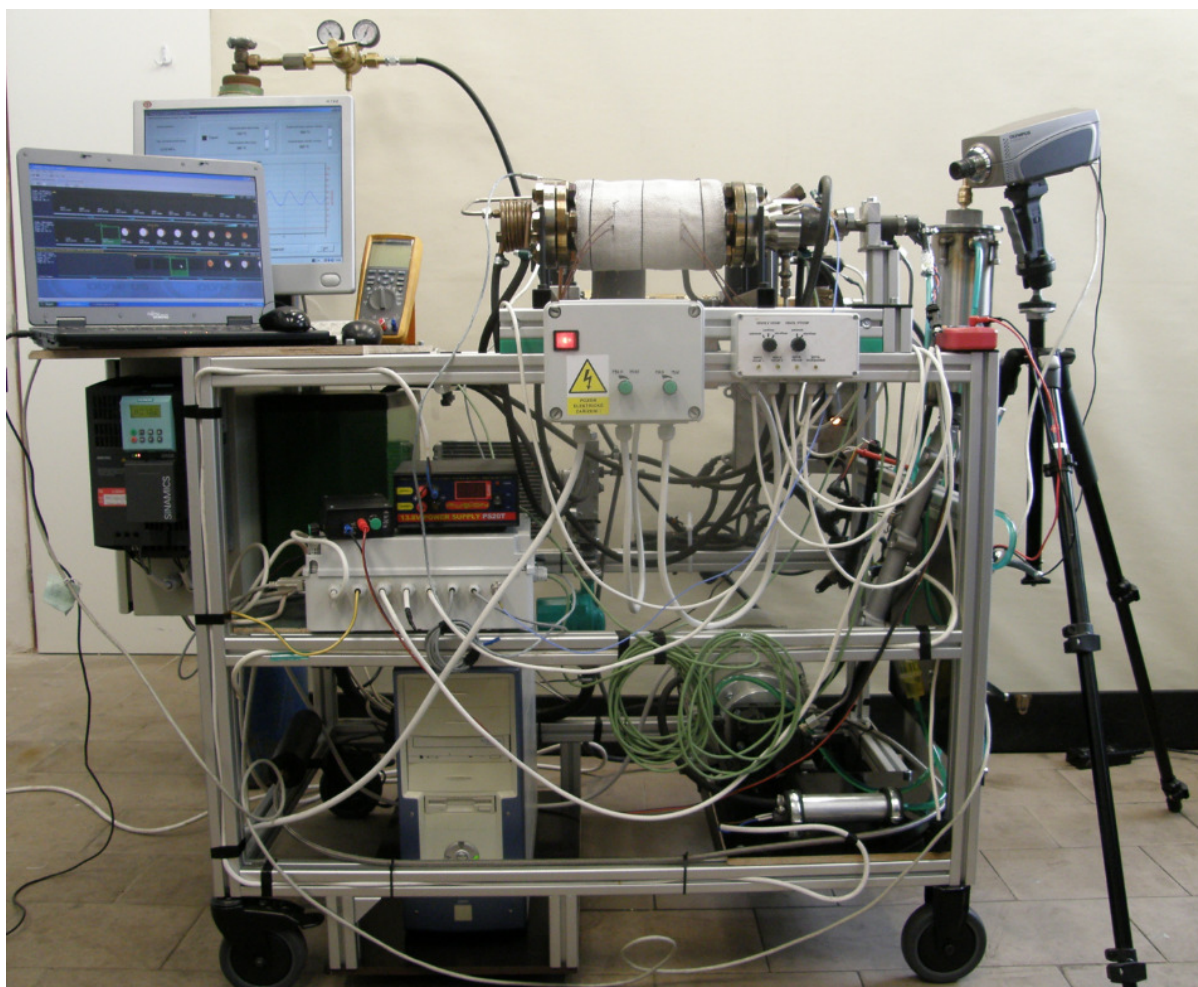
dojde pouze k zastavení jeho nárůstu. Nárůst tlaku pokračuje až po uplynutí doby odpovídající frekvenci kmitání náplně v komoře. Tato frekvence představuje další rozdílnost mezi vypočteným a naměřeným průběhem tlaku. Zatímco u výpočtového průběhu je frekvence kmitání přibližně 0,6 kHz, v případě měřeného průběhu tlaku má tato frekvence hodnotu přibližně 1 kHz. Pro kontrolu je možné jednoduše vypočítat frekvenci tlakových vln z rychlosti zvuku ve stlačeném vzduchu v komoře (teplota na počátku vstřiku 800 K). Podle vzorce (13) je rychlost zvuku 567 m/s, při délce spalovacího prostoru 0,315 m vychází frekvence kmitání tlakových vln přibližně 0,9 kHz. Naměřená frekvence je vyšší než vypočtená patrně kvůli vyšší rychlosti zvuku ve vzniklých spalínách, které zaujímají část objemu komory v okolí vstřikovače. Rozdíly v průbězích tlaku se dají pozorovat také ve velikosti útlumu tlakových vln a v dalších parametrech. Přínosem tohoto srovnání je mimo jiné potvrzení známého faktu, že v takto složitých případech, jakými jsou procesy obsahující hoření, nemůže samotný výpočtový model bez kalibrace podložené experimentem postačit k dokonalému popisu problematiky.

$$v = \sqrt{\kappa \cdot r \cdot T} = \sqrt{1,402 \cdot 287 \cdot 800} \cong 567 \frac{m}{s} \quad (13)$$

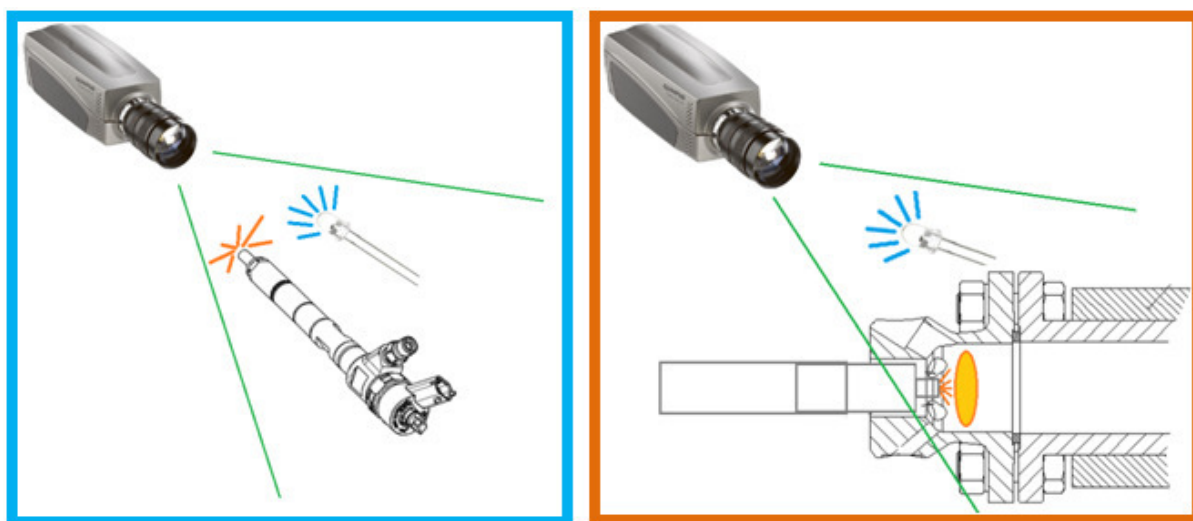
6.2 Vyšetřování průběhu vstřiku paliva a průběhu hoření vysokorychlostní kamerou

6.2.1 Popis experimentu

Digitální černobílou vysokorychlostní kamerou Olympus i-SPEED 2 byl pořízen záznam průběhu vstřiku paliva do atmosféry s frekvencí záznamu 33 kHz. Stejnou aparaturou byl pořízen záznam průběhu hoření v komoře. Aby bylo možné oba záznamy porovnat na jedné časové ose, byly v zorném poli kamery v obou případech umístěny vysoce svítivé LED diody. Tyto diody byly paralelně připojeny k elektrickému napájení elektromagnetického řídicího prvku vstřikovače. Doba úplného rozsvícení LED diod je kratší než 1 μ s. Pro sjednocení časové osy je však mnohem důležitější, že k rozsvícení diod dojde v obou případech se stejnou časovou prodlevou po přivedení napájecího napětí na vstřikovač.

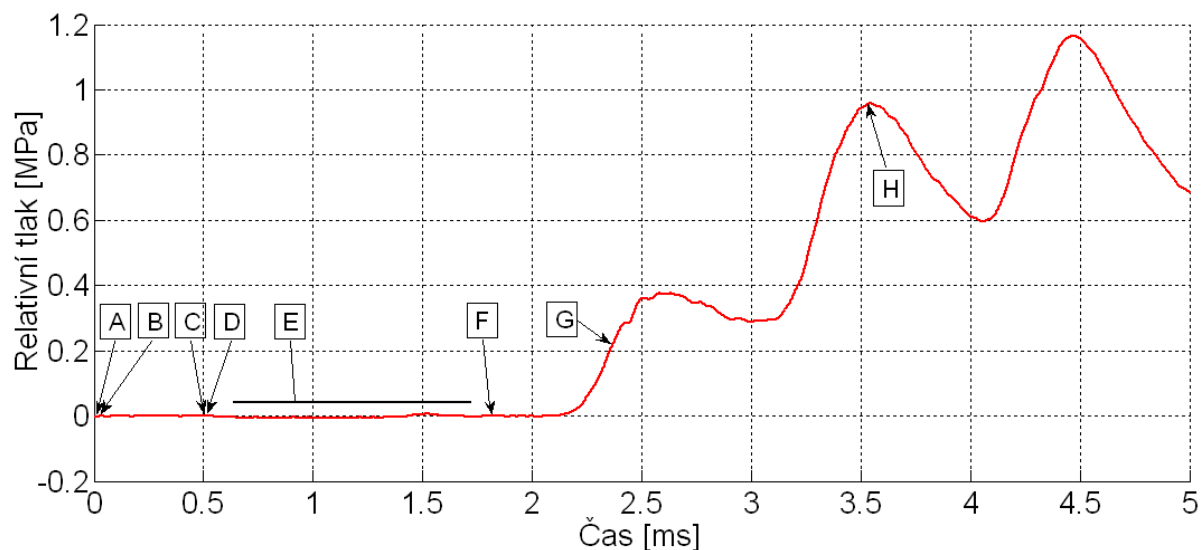


Obrázek 33: Měření s vysokorychlostní kamerou namířenou na safírové okénko v čele komory.

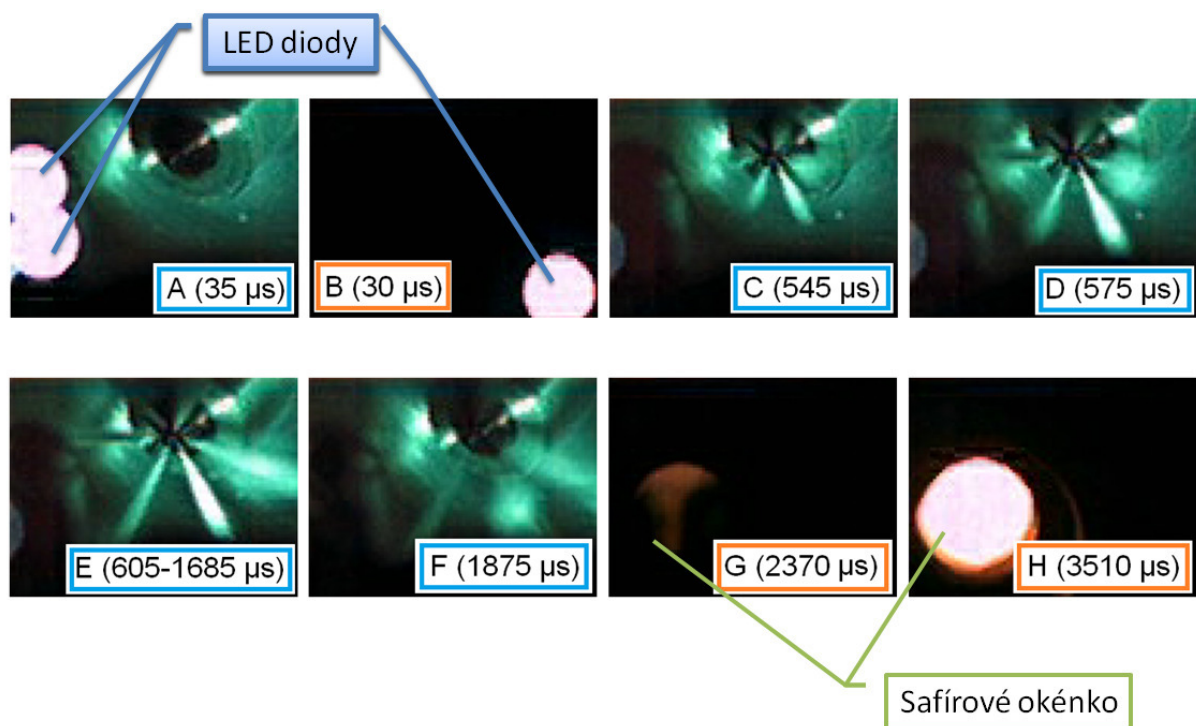


Obrázek 34: Schematické znázornění pořizování dvou videí vysokorychlostní kamerou (vlevo záznam vstříku do atmosféry, vpravo záznam průběhu hoření v komoře).

Graf 10 znázorňuje na časové ose nejvýznamnější body jednotlivého měření. Písmena A až H označují konec expozice patřičného snímku (viz Obrázek 35). Na svislé ose grafu je hodnota relativního tlaku. Absolutní tlak v komoře je o 2,5 MPa vyšší. Počátek časové osy je v okamžiku přivedení napájecího napětí na cívku vstřikovače. Pro snadnější orientaci jsou snímky pořízené skrz safírové okénko označeny oranžovou barvou a snímky získané při vstřiku paliva do atmosféry označeny barvou modrou.



Graf 10: Příklad průběhu relativního tlaku náplně s vyznačením významných bodů (viz Obrázek 34 a Obrázek 35).

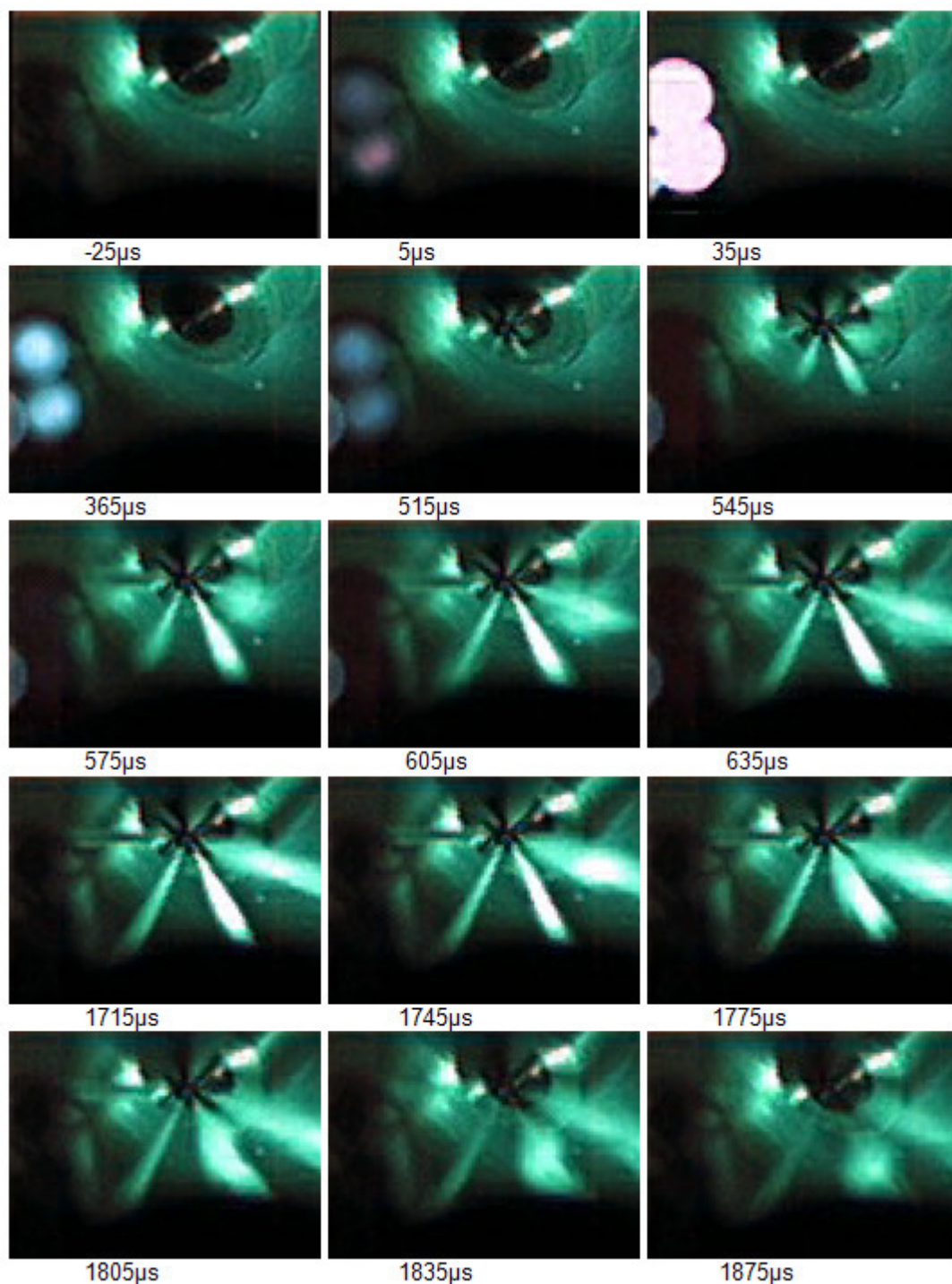


Obrázek 35: Kompilace nejzajímavějších snímků z 1. a 2. videa, zachycující průběh vstřiku paliva a světelné záření hořící směsi.

- A – 35 μs po přivedení napájecího napětí na vstřikovač – 1. video,
- B – 30 μs po přivedení napájecího napětí na vstřikovač – 2. video,
- C, D – počátek vstřiku paliva – 1. video,
- E – vstřikování paliva – 1. video,
- F – konec vstřiku paliva – 1. video,
- G – přibližně 200 μs po vznícení paliva (nízká intenzita světla) – 2. video,
- H – hoření (vysoká intenzita světla) – 2. video.

Výsledkem tohoto experimentu je informace o čase, který uplyne mezi přivedením napájecího napětí na cívku vstřikovače a počátkem vstřiku paliva. Tento čas je v případě tlaku v railu 1000 bar okolo 515 μs . Odpadá tedy nutnost měření zdvihu jehly vstřikovače. Díky kalibraci zařízení referenčními palivy není tato informace nezbytná k určení hodnoty OCC, ale poskytuje možnost určení skutečné hodnoty průtahu vznícení, který je možné snadno dopočítat odečtením od času nárůstu tlaku v komoře hodnoty 515 μs .

Dalším zajímavým zjištěním je, že kamera je schopná zaznamenat viditelné složky záření při hoření již při nárůstu tlaku o hodnotu přibližně 0,2 MPa (políčko G).



Obrázek 36: Nejzajímavější políčka videa pořízeného při vstřiku do atmosféry.

Počátek časové osy je totožný s počátkem sepnutí výkonového prvku (tranzistoru), který připojí cívku elektromagnetu k soustavě kondenzátorů s počátečním napětím cca 96 V. Jednotlivé obrázky jsou označeny časem konce expozice snímku. Obrázek s označením 5 μs díky rychlému náběhu LED diod ($<1\mu\text{s}$) nezobrazuje nižší intenzitu svítivosti LED diod, ale krátký čas expozice s plně svítícími diodami (přibližně 5 μs z celkové doby expozice

30 μs). Analýzou obrázků znázorňujících počátek vstřiku (515 μs až 575 μs) je možné stanovit i výtokovou rychlost paprsku nafty. Při tomto nastaveném tlaku vychází rychlost kolem 180 m/s. Údaj o výtokové rychlosti je však uveden pouze pro zajímavost, je nutné si uvědomit, že je video pořízeno při vstřiku do atmosféry (v případě vstřiku do komory je tlak vzduchu 25 bar).

7 TVORBA PREDIKTIVNÍHO MODELU

7.1 Popis problematiky

Nezbytnou součástí zkušebního zařízení je vedle funkční aparatury také vhodná statistická metoda zpracování naměřených výsledků. Protože navržené zařízení měří cetanové číslo paliv nepřímo, je důležitá jeho kalibrace referenčními palivy. Výsledkem této kalibrace je tvorba vhodného prediktivního modelu, který měřenému vzorku neznámého paliva korektně přiřadí hodnotu OCČ.

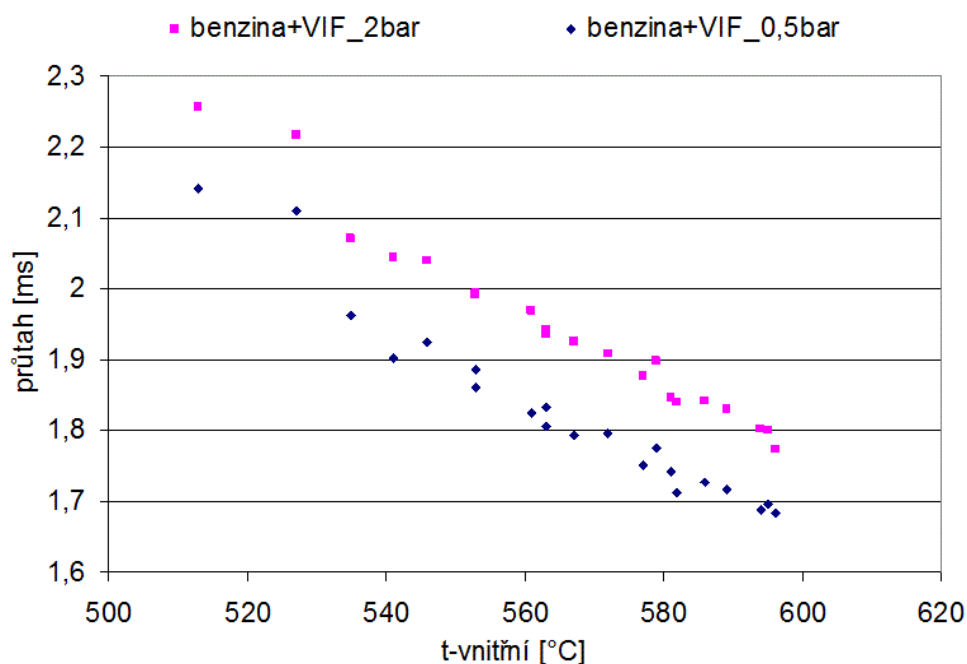
Velmi složitá závislost hodnoty OCČ na měřených a nastavovaných veličinách vede k řešení nelineární vícerozměrné statistiky. Numerických postupů stanovení parametrů regresních nelineárních modelů je celá řada. Kromě derivačních metod existuje řada nederivačních optimalizačních postupů, jako jsou např. simplexové metody, metody přímého hledání, metody založené na využívání náhodných čísel, „genetické metody“ a další. Volba vhodného optimalizačního postupu vyžaduje značnou míru zkušeností, aby zvolený postup konvergoval a neukončil svoji činnost před nalezením optima.

Výkon dnešní výpočetní techniky nabízí sice méně elegantní, ale jistou a snadnější cestu k hledání hodnot parametrů navrženého prediktivního modelu. Jedná se o nahrazení sofistikovaných adaptivních metod metodou zaměřenou pouze na nalezení minima sumy čtverců odchylek predikované hodnoty OCČ od hodnoty OCČ referenčního paliva. Minimum sumy čtverců odchylek je jediným vybraným kritériem, které porovnává propočítané kombinace neznámých parametrů obsažených v modelu.

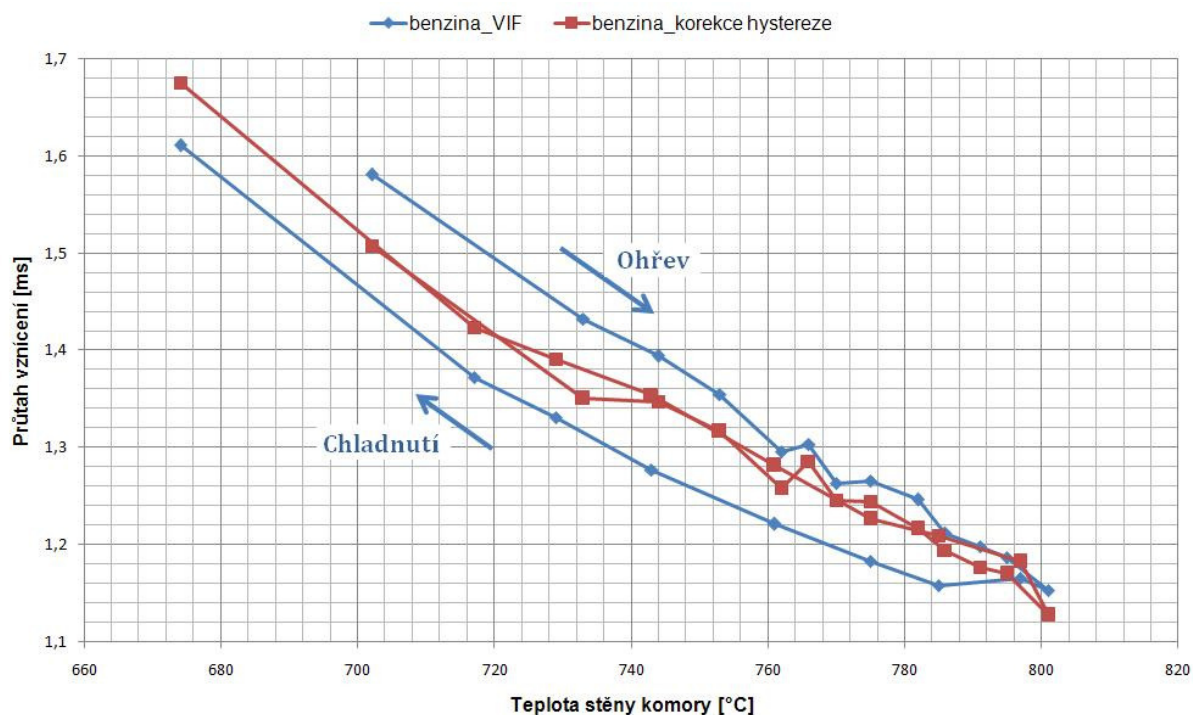
Postup tvorby prediktivního modelu se sestává z návrhu modelu, určení počtu parametrů, určení počátečních intervalů parametrů, postupu zjemnění těchto parametrů až po nalezení takové kombinace parametrů, jejichž další zpřesňování již nevede ke snižování zmíněné sumy čtverců odchylek.

7.2 Návrh modelu

Pomocí četných měření se zjišťovaly závislosti mezi nastavovanými veličinami a hodnotou průtahu vznícení. Veličiny, jejichž hodnoty lze velmi snadno regulovat, jako tlak náplně v komoře a tlak paliva v zásobníku (railu), nemají v rámci regulační odchylky měřitelný vliv na hodnotu průtahu vznícení. Při návrhu prediktivního modelu bylo důležité zohlednit hlavně teplotu náplně (viz Graf 11) a vývoj teploty stěny komory (viz Graf 12).



Graf 11: Příklad vlivu hodnoty průtahu vznícení na teplotě náplně.



Graf 12: Závislost průtahu vznícení na teplotě stěny a předchozím bodu

Graf 12 ukazuje nejenom na významnou korelaci mezi hodnotou průtahu vznícení a teplotou vnější stěny komory, ale také na hysterezi zapříčiněnou velkou teplotní setrvačností spalovací komory. Hystereze v případě daného systému se chová jako parazitní nelinearita a

má proto negativní vliv na správné vyhodnocení naměřených dat.

Kompenzovat hysterezi je možné pomocí jejího inverzního modelu. Fyzikální podstata daného systému je tak složitá, že nalezení stoprocentně věrohodného modelu by bylo velice náročné, a je tedy potřeba provést některá zjednodušení. Korektní by bylo modelovat danou hysterezi jako hysterezi s nelokální pamětí, protože systém dovoluje vytváření vnitřních smyček, které nezačínají na vnější hysterezní smyčce. Šířka hysterezní smyčky je omezena maximální rychlostí ohřevu komory a jejím nejrychlejším ochlazováním. Korektní model by potom uvažoval historii výkonu topných těles, průtok a teplotu chladicí kapaliny, teplotu okolního vzduchu, vyplachování komory čerstvým vzduchem atd. Míra hystereze je ovlivněna hlavně změnou výkonu topných těles, tak aby přes změnu teploty chladicí kapaliny bylo dodrženo požadované rozmezí teploty uvnitř komory před vstřikem paliva. Ze zkušeností získaných velkým počtem měření je patrné, že je možné opatrnou regulací výkonu topných těles docílit změny teplot menší než cca 10 °C/hod. Kompenzace hystereze je tedy zapotřebí zvláště při měření nezkušenou obsluhou.

Graf 12 dále ukazuje, že velikost hystereze je možné snížit jejím inverzním modelem obsahujícím pouze hodnotu stěny komory ($T_{stěny_n}$) a hodnotu stěny komory z předchozího měření ($T_{stěny_n-1}$). Křivka dosažená kompenzací na základě těchto dvou hodnot je zobrazena v grafu červenou barvou. Modrou barvou je znázorněn extrémní případ hystereze, kterého bylo dosaženo nastavením maximálního výkonu topných těles a jejich následným vypnutím. Při měření byl dosažen vysoký gradient teploty (až 1200 °C/hod), který zvětšil hysterezi na maximum.

Na základě výše zmíněného a explorativní statistiky byl navržen model (14):

$$OCC = F \cdot \exp\left(A + \frac{B}{pv + C \cdot (T_{vnitřní} + E \cdot (T_{stěny_n} - T_{stěny_n-1}) - D)}\right) \quad (14)$$

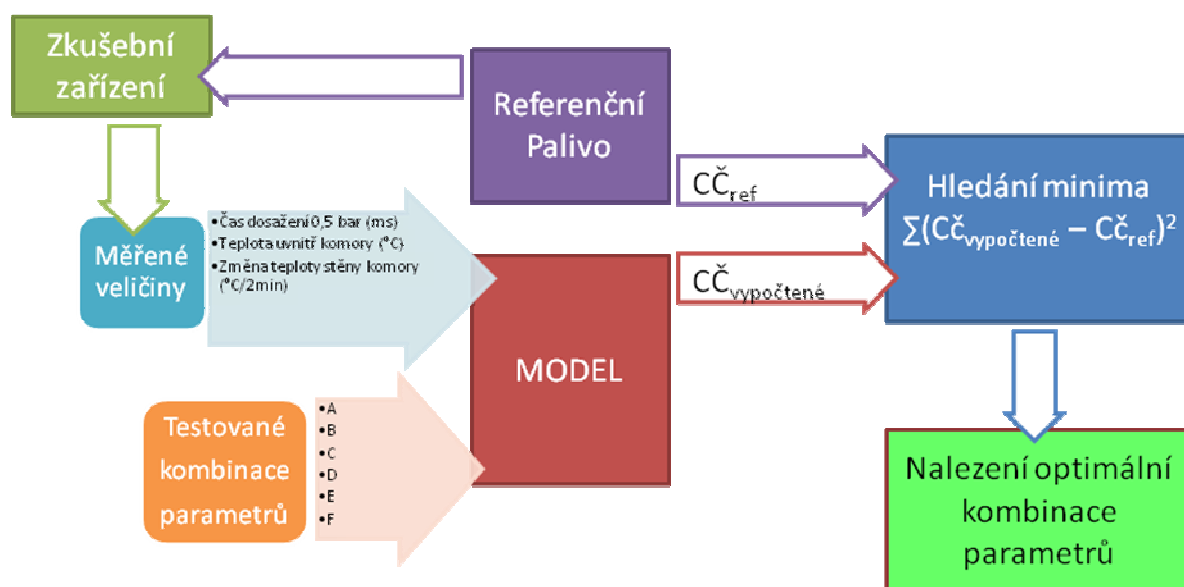


Schéma 1: Výpočet optimální kombinace parametrů.

Schéma 1 zobrazuje princip získání kombinace parametrů A až F. Změřením přesně namíchaných vzorků jednotlivých referenčních paliv se získají veličiny vstupující do výpočtu OCČ (čas překročení relativního tlaku 0,5 bar, teplota uvnitř komory a změna teploty stěny komory). Tyto tři veličiny vstupují spolu s parametry A až F do modelu a výsledkem je hodnota $C\check{C}_{\text{vypočtené}}$, která je porovnávána se známou hodnotou $C\check{C}_{\text{ref}}$. Účelem je hledání takové kombinace parametrů A až F, aby bylo nalezeno minimum součtu čtverců odchylek pro provedená měření.

S ohledem na velký počet měření (přibližně 200), je důležité nejprve odhadnout přibližné hodnoty parametrů a navrhnout testovací intervaly těchto parametrů. Intervaly je zapotřebí následně rozdělit na nepříliš velký počet částí (dílů). Počet těchto částí ovlivňuje celkový čas výpočtu s šestou mocninou. Například 10 kroků pro každý interval povede k celkovému počtu výpočtů $200 \cdot 10^6$, tedy 200 miliónům výpočtů. Pouhé zjemnění kroku na polovinu povede k 2^6 krát většímu počtu výpočtů (12,8 miliard výpočtů). Jako optimální nastavení výpočtu se ukázalo rozdělení intervalů na 10 až 15 kroků tak, aby celkový počet výpočtů nepřekročil jednu miliardu. Takové nastavení bylo vždy přes noc dopočítáno.

Po skončení jednoho iteračního kroku (jednoho nastavení) byl zúžen interval každého parametru na symetrické okolí okolo posledního výsledku a patřičně byl tento interval znovu rozdělen na 10 až 15 částí. Takto se postupovalo do doby, než zpřesňování parametrů nevedlo ke snižování sumy čtverců odchylek. Makro, které vrací kombinaci parametrů s nejmenší nalezenou sumou čtverců odchylek je v příloze (1).

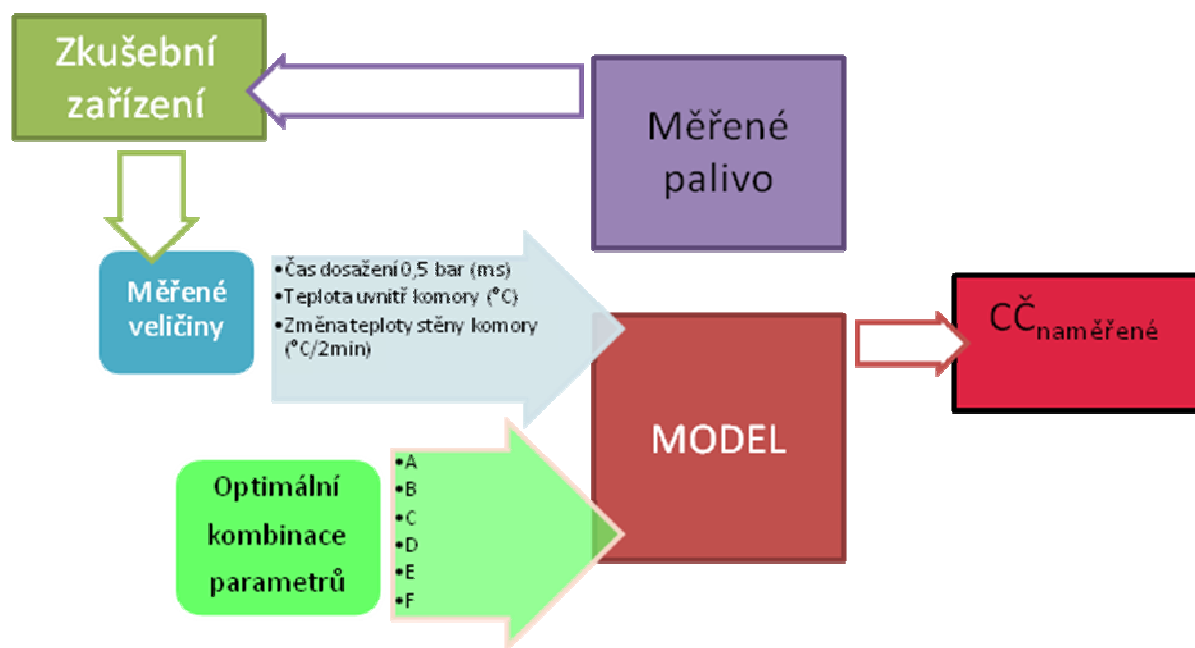


Schéma 2: měření CČ neznámého vzorku paliva.

Po nalezení optimální kombinace parametrů A až F je možné prediktivní model použít k určení OCČ neznámého vzorku paliva (Schéma 2). Pro doložení spolehlivosti zařízení by bylo nezbytné určit kalibrační interval. Tento interval by bylo vhodné zpočátku zvolit na půl roku a v případě, že by chyba po několika kalibracích zůstávala hluboko pod hranicí povolené chyby, by bylo možné tento interval prodlužovat. Stabilitu výsledků je možné v době mezi kalibracemi ověřovat testováním známého vzorku paliva. Bezprostředně po kalibraci drahými referenčními palivy by se změřilo palivo, jehož si ponecháme větší množství (třeba 20l kanystr) k pozdější kontrole stability měření. Před každým plánovaným měřením vzorku by potom bylo možné provést kontrolu za pomoci známého paliva. Palivo určené k takovému účelu by mělo mít malou závislost vznětlivosti na době skladování. Vhodná by byla například motorová nafta bez bio složky.

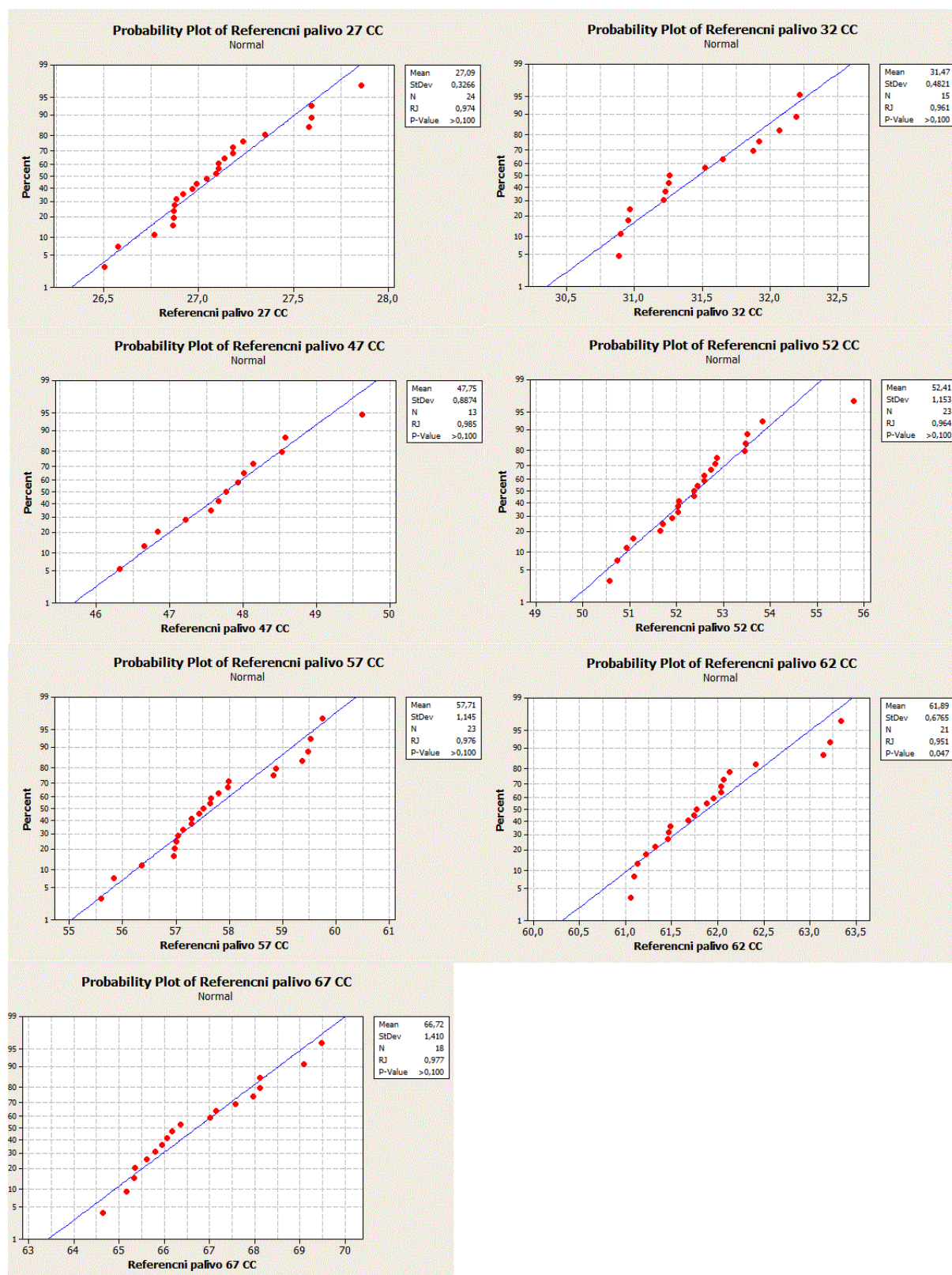
7.3 Předzpracování dat

Měření referenčních paliv bylo, z časových důvodů, naplánováno již po několika málo testovacích měření po dokončení stavby nového zařízení a proto nebyla obsluha natolik zkušena, aby dokázala obsluhovat zařízení bezchybně. Při měření referenčních paliv se tedy mnohokrát stalo, že chyběl záznam některé veličiny, nebyl dodržen dvouminutový interval mezi měřeními nebo nebylo dosaženo všech počátečních podmínek měření, které by mohly ovlivnit výsledek měření. Obsluha při měření našťastí tyto omyly zaznamenávala do tabulky doplňující zdrojová data.

Odstraňování odlehlých hodnot ze souboru dat je v případě neznalosti příčiny jejich odlehlosti riskantní, protože hrozí odstranění korektních dat. Díky výše zmíněným důvodům je v tomto případě odstranění odlehlých hodnot opodstatněné. Ideální by samozřejmě bylo opakovat měření po získání větších zkušeností se zařízením. Opakování však bránil nedostatek referenčních paliv, která se podařilo získat pouze v množství umožňujícím namíchat dohromady 8 litrů vzorků. Dohromady bylo namícháno 7 vzorků paliv s hodnotou: 27, 32, 47, 52, 57, 62 a 67 OCČ záměrně byly z posloupné řady vynechány vzorky 37 a 42 OCČ, což ušetřilo palivo, které mohlo být použito k namíchání vzorků již od hodnoty 27 CČ aby se ověřila funkčnost prediktivního modelu v širokém rozsahu.

7.3.1 Vyloučení odlehlých hodnot ze souboru dat

Ryan-Joinerův test normality potvrdil na hladině spolehlivosti minimálně $\alpha = 0,95$ předpoklad, že data mají Gaussovo normální rozdělení. Výsledky testů normality, provedených v programu Minitab jsou znázorněny v Graf (13).



Graf (13): Výsledky testů normality dat z měření referenčních paliv.

Díky potvrzení normálního rozdělení dat, bylo možné k vyloučení odlehlých hodnot použít Grubbsovy testy: Grubbs1, Grubbs2 a Grubbs3. Výpočet hodnot testů G1, G2 a G3 se

provede po vzestupném uspořádání dat pomocí vzorců uvedených níže. Vypočtené hodnoty se následně porovnávají s kritickými hodnotami Grubbsových testů (viz Tabulka 2).

$$G1 = \frac{|\bar{x} - x_i|}{s} \quad (15)$$

$$G1 = \frac{|x_n - x_1|}{s} \quad (16)$$

$$G3 = 1 - \frac{(n-3) \cdot s_{n-2}^2}{(n-1) \cdot s^2} \quad (17)$$

| n | 95% hladina spolehl. | | | 99% hladina spolehlivosti | | |
|----|----------------------|----------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------|
| | G ₁ | G ₂ | G ₃ | G ₁ | G ₂ | G ₃ |
| 3 | 1.153 | 2.00 | - | 1.155 | 2.00 | - |
| 4 | 1.463 | 2.43 | 0.9992 | 1.492 | 2.44 | 1.0000 |
| 5 | 1.672 | 2.75 | 0.9817 | 1.749 | 2.80 | 0.9965 |
| 6 | 1.822 | 3.01 | 0.9436 | 1.944 | 3.10 | 0.9814 |
| 7 | 1.938 | 3.22 | 0.8980 | 2.097 | 3.34 | 0.9560 |
| 8 | 2.032 | 3.40 | 0.8522 | 2.221 | 3.54 | 0.9250 |
| 9 | 2.110 | 3.55 | 0.8091 | 2.323 | 3.72 | 0.8918 |
| 10 | 2.176 | 3.68 | 0.7695 | 2.410 | 3.88 | 0.8586 |
| 12 | 2.285 | 3.91 | 0.7004 | 2.550 | 4.13 | 0.7957 |
| 13 | 2.331 | 4.00 | 0.6705 | 2.607 | 4.24 | 0.7667 |
| 15 | 2.409 | 4.17 | 0.6182 | 2.705 | 4.43 | 0.7141 |
| 20 | 2.557 | 4.49 | 0.5196 | 2.884 | 4.79 | 0.6091 |
| 25 | 2.663 | 4.73 | 0.4505 | 3.009 | 5.03 | 0.5320 |
| 30 | 2.745 | 4.89 | 0.3992 | 3.103 | 5.19 | 0.4732 |
| 35 | 2.811 | 5.026 | 0.3595 | 3.178 | 5.326 | 0.4270 |
| 40 | 2.866 | 5.150 | 0.3276 | 3.240 | 5.450 | 0.3896 |
| 50 | 2.956 | 5.350 | 0.2797 | 3.336 | 5.650 | 0.3328 |

Tabulka 2: Kritické hodnoty Grubbsových testů.

| pořadí testu | 27 | 32 | 47 | 52 | 57 | 62 | 67 |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| 1 | | | | | | | |
| 2 | 27,80245 | 30,55357 | | | 56,09243 | 60,84326 | |
| 3 | 27,28611 | 32,74896 | | | | 61,91771 | |
| 4 | 27,1099 | 31,36553 | 47,20712 | 53,38602 | 57,58584 | 61,48902 | |
| 5 | 27,35785 | 30,84748 | 47,76636 | 51,37735 | 56,35317 | 61,20003 | |
| 6 | 27,672 | 31,422 | | 52,352 | 57,198 | 60,975 | 66,897 |
| 7 | 27,134 | 32,163 | 45,743 | 51,727 | 57,522 | 61,219 | 66,153 |
| 8 | 27,858 | 31,351 | 46,205 | 52,735 | 57,265 | 62,644 | 65,912 |
| 9 | 26,882 | 31,705 | 45,288 | 52,727 | 57,036 | 62,230 | 65,563 |
| 10 | 27,235 | 32,027 | 46,317 | 52,100 | 57,592 | 62,102 | 67,588 |
| 11 | 26,504 | 32,450 | 48,140 | 52,188 | 56,964 | 62,053 | 66,987 |
| 12 | 27,103 | 32,407 | 46,659 | 50,451 | 57,129 | 61,697 | 66,372 |
| 13 | 26,866 | 31,749 | 47,669 | | 57,421 | 60,784 | 66,491 |
| 14 | 27,595 | 32,766 | 48,011 | | 57,421 | 60,764 | |
| 15 | 26,577 | 32,609 | 47,927 | 51,150 | 55,743 | 63,452 | |
| 16 | 27,044 | 31,740 | 45,966 | 51,391 | 57,577 | 61,877 | |
| 17 | 26,873 | 31,713 | 48,571 | 51,148 | 57,422 | 61,040 | |
| 18 | 27,181 | 31,433 | | 53,262 | 56,957 | 61,736 | 66,065 |
| 19 | 26,766 | 31,281 | 46,225 | 51,746 | 57,528 | 61,323 | 67,408 |
| 20 | 27,105 | 30,978 | 47,501 | 52,679 | 58,187 | 63,076 | 66,769 |
| 21 | 26,991 | 31,183 | 48,342 | 52,796 | 56,011 | 60,921 | 67,944 |
| 22 | 27,179 | | 46,786 | 52,905 | | 61,101 | |
| 23 | 27,596 | | | 52,299 | 58,193 | 62,398 | 67,939 |
| 24 | 27,580 | | | 52,781 | 56,999 | 61,568 | 68,085 |
| 25 | 26,863 | | | 51,991 | 56,443 | 62,022 | 67,142 |
| 26 | 27,089 | | | 52,591 | 56,545 | 61,329 | 67,261 |
| 27 | 27,348 | | | 53,543 | 57,501 | 63,135 | |
| 28 | 26,965 | | | 51,565 | 57,761 | 61,195 | |
| 29 | 26,869 | | | 50,862 | 58,059 | 61,548 | |
| 30 | 26,919 | | | 52,412 | 57,269 | 62,338 | |
| průměr | 27,150 | 31,725 | 47,078 | 52,167 | 57,177 | 61,723 | 66,911 |

Tabulka 3: Stanovené hodnoty OCČ před odstraněním odlehlých hodnot.

| | |
|--|--|
| | Chybí předchozí měření pro kompenzaci hystereze |
| | Chybí minimálně jedna z měřených veličin vstupujících do výpočtu |
| | Vyřazeno Grubbovým testem |
| | Měření bylo ukončeno před naměřením 30ti hodnot |

Při analýze naměřených hodnot je patrné, že většina odstraněných hodnot se nachází mezi prvními pěti měřeními (Tabulka 3). To je zapříčiněno jednak nezkušenou obsluhou, ale ukazuje to i na skutečnost, že k dosažení ustáleného stavu (výsledků) je zapotřebí provést několik měření pro záběh. U složitých měřicích zařízení je běžné, že je předřazena před samotným měřením "zahřívací" procedura. V tomto případě postačí přidat k požadovanému počtu měření pět měření. Výsledky prvních pěti měření by se potom nezahrnovaly do výpočtu OCČ.

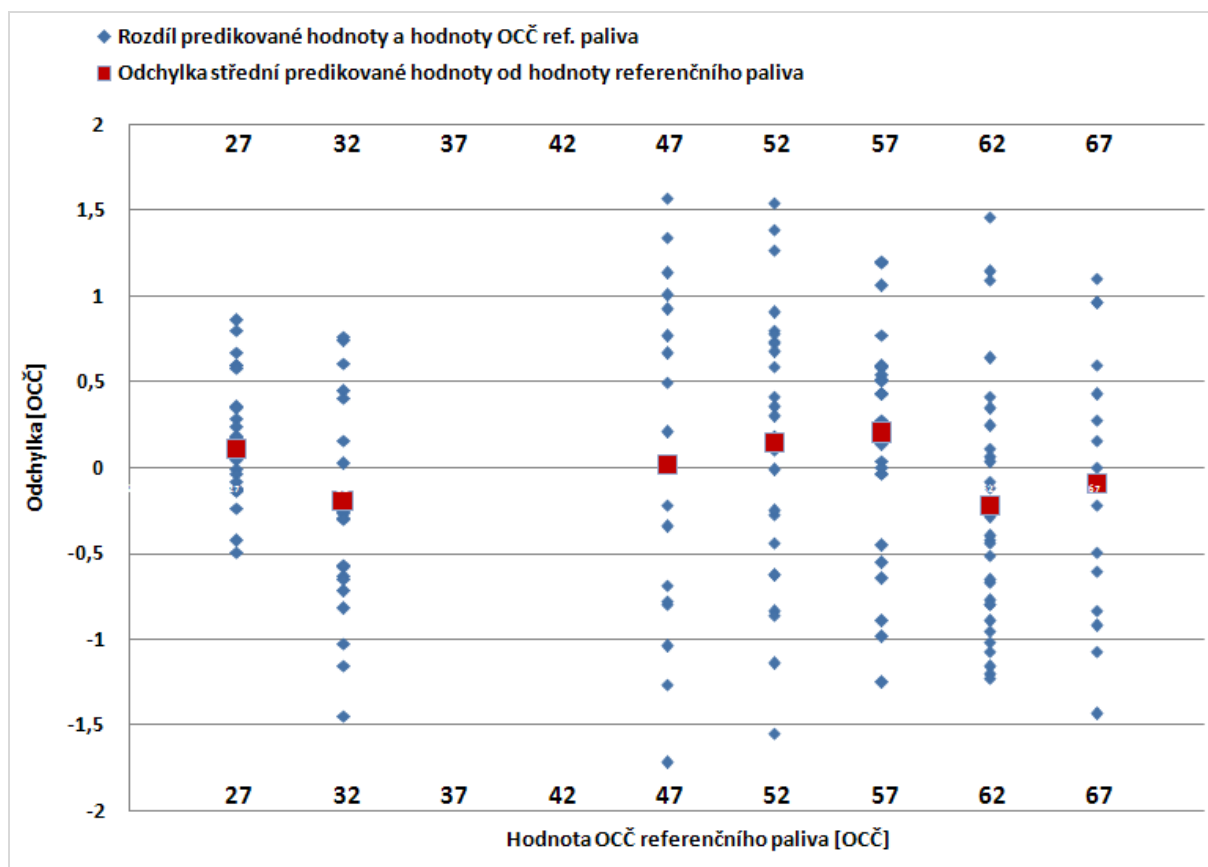
| pořadí testu | 27 | 32 | 47 | 52 | 57 | 62 | 67 |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | |
| 6 | 27,672 | 31,422 | | 52,352 | 57,198 | 60,975 | 66,897 |
| 7 | 27,134 | 32,163 | 45,743 | 51,727 | 57,522 | 61,219 | 66,153 |
| 8 | 27,858 | 31,351 | 46,205 | 52,735 | 57,265 | 62,644 | 65,912 |
| 9 | 26,882 | 31,705 | 45,288 | 52,727 | 57,036 | 62,230 | 65,563 |
| 10 | 27,235 | 32,027 | 46,317 | 52,100 | 57,592 | 62,102 | 67,588 |
| 11 | 26,504 | 32,450 | 48,140 | 52,188 | 56,964 | 62,053 | 66,987 |
| 12 | 27,103 | 32,407 | 46,659 | 50,451 | 57,129 | 61,697 | 66,372 |
| 13 | 26,866 | 31,749 | 47,669 | | 57,421 | 60,784 | 66,491 |
| 14 | 27,595 | 32,766 | 48,011 | | 57,421 | 60,764 | |
| 15 | 26,577 | 32,609 | 47,927 | 51,150 | 55,743 | 63,452 | |
| 16 | 27,044 | 31,740 | 45,966 | 51,391 | 57,577 | 61,877 | |
| 17 | 26,873 | 31,713 | 48,571 | 51,148 | 57,422 | 61,040 | |
| 18 | 27,181 | 31,433 | | 53,262 | 56,957 | 61,736 | 66,065 |
| 19 | 26,766 | 31,281 | 46,225 | 51,746 | 57,528 | 61,323 | 67,408 |
| 20 | 27,105 | 30,978 | 47,501 | 52,679 | | 63,076 | 66,769 |
| 21 | 26,991 | 31,183 | 48,342 | 52,796 | 56,011 | 60,921 | 67,944 |
| 22 | 27,179 | | 46,786 | 52,905 | | 61,101 | |
| 23 | 27,596 | | | 52,299 | 58,193 | 62,398 | 67,939 |
| 24 | 27,580 | | | 52,781 | 56,999 | 61,568 | 68,085 |
| 25 | 26,863 | | | 51,991 | 56,443 | 62,022 | 67,142 |
| 26 | 27,089 | | | 52,591 | 56,545 | 61,329 | 67,261 |
| 27 | 27,348 | | | 53,543 | 57,501 | 63,135 | |
| 28 | 26,965 | | | 51,565 | 57,761 | 61,195 | |
| 29 | 26,869 | | | 50,862 | 58,059 | 61,548 | |
| 30 | 26,919 | | | 52,412 | 57,269 | 62,338 | |
| průměr | 27,112 | 31,811 | 47,023 | 52,148 | 57,198 | 61,781 | 66,911 |

Tabulka 4: Vypočtené hodnoty CC po odstranění odlehlých hodnot a hodnot zařazených do „zahřívací“ procedury.

Na základě identifikace dat, která jsou vhodná vyřadit ze souboru kalibračních dat, bylo provedeno nové hledání optimální kombinace parametrů A až F obsažených v prediktivním modelu. Stejným způsobem by se mělo postupovat při případných kalibracích zařízení.

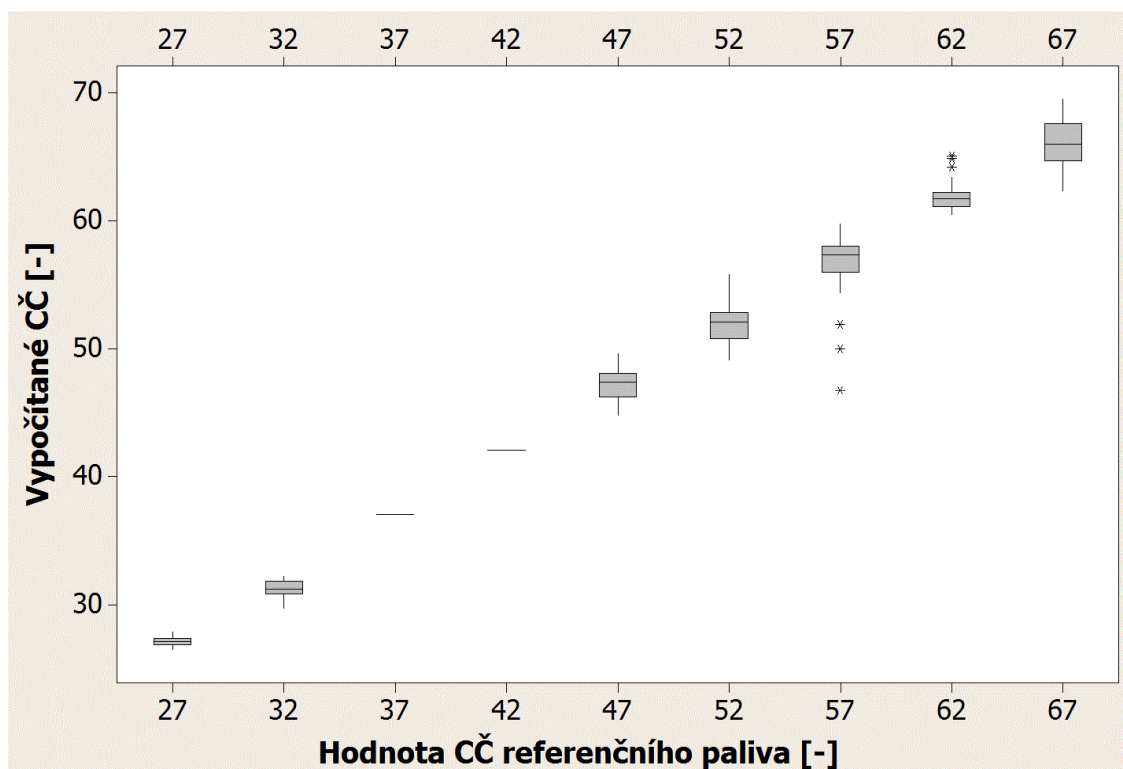
Po dosazení stanovených parametrů A až F do navrženého modelu (14) vznikl výsledný prediktivní model (18) ke stanovení OCČ z naměřených hodnot.

$$OCČ = 0,999855 \cdot \exp(2,7518 + \frac{2,5292}{pv + 0,00405 \cdot (T_{vnitřní} - 0,633 \cdot (T_{steny_n} - T_{steny_n-1}) - 523,7)}) \quad (18)$$

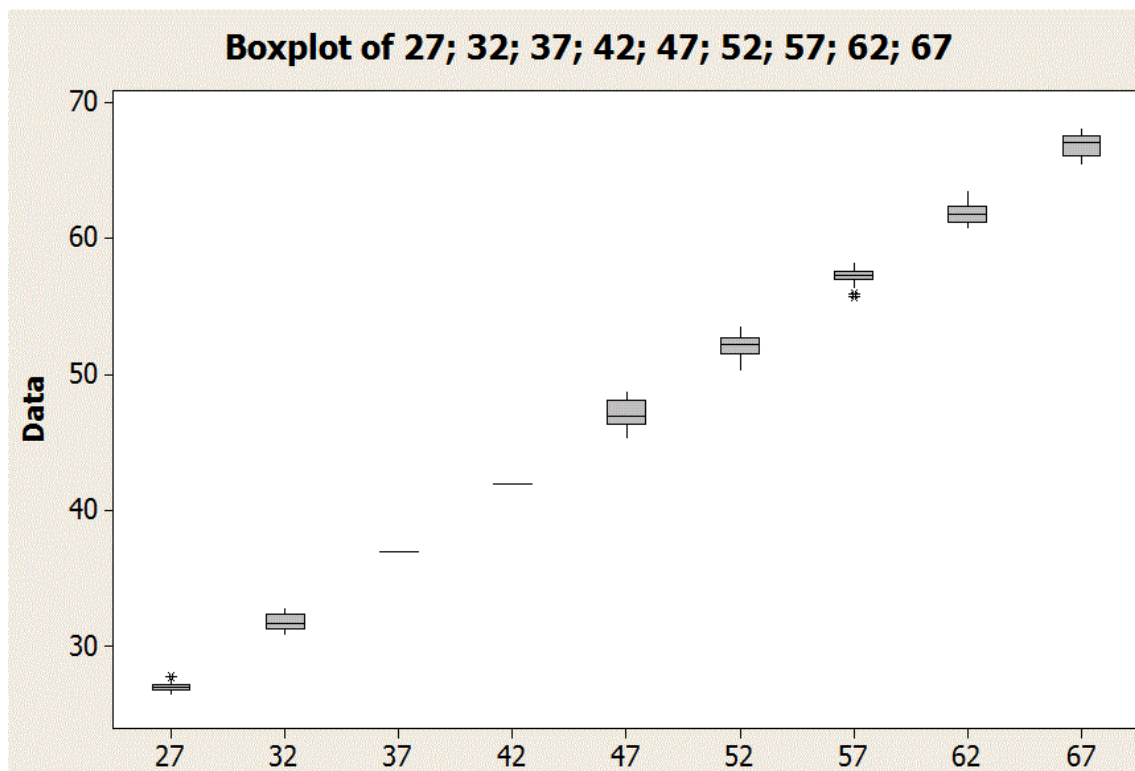


Graf 14: Rozdíly hodnoty OCČ referenčního paliva a vypočítaných (predikovaných) hodnot OCČ po dosazení optimální kombinace nalezených parametrů A až F.

Vhodnost navrženého modelu potvrzuje Graf 14, který zobrazuje jednak odchylky predikované hodnoty OCČ jednotlivých měření od hodnoty OCČ příslušného referenčního paliva (modrá barva), ale také průměrné hodnoty těchto odchylek (červená barva). Maximální odchylka průměrné predikované hodnoty je 0,22 OCČ. Nejmenšího rozptylu jednotlivých měření bylo dosaženo při měření referenčního paliva s hodnotou 27 OCČ. To je pravděpodobně zapříčiněno menší strmostí křivky popisující závislost průtahu vznícení na hodnotě OCČ, která vede k lepší podmíněnosti výpočtu.



Graf 15:Krabicový graf všech dat před odstraněním odlehlých hodnot.



Graf 16:Krabicový graf všech dat po odstranění odlehlých hodnot.

7.3.2 Návrhy zlepšení zařízení:

Kromě již zmíněné inovace palivového systému (kap. 5.4.2.), jejíž největší technické úskalí spočívá v nalezení těsnicího prvku schopného utěsnit tlaky paliv s různým chemickým složením přesahující 1000 barů, se v průběhu vyhodnocování naměřených dat ukázalo nevhodné měření teploty stěny komory na jejím vnějším plášti. Toto řešení bylo vybráno pro svojí snadnou technickou proveditelnost, ale dá se předpokládat, že měření v těsné blízkosti vnitřní stěny komory by vedlo k lepší schopnosti prediktivního modelu kompenzovat hysterezi vzniklou teplotní setrvačností komory.






Dále by stála za zvážení taková úprava měřicího softwaru, která by umožňovala automatický provoz i v době mezi jednotlivými měřeními včetně výměny náplně. Výměna náplně se zatím provádí v manuálním režimu a to se zřejmě negativně projevuje na opakovatelnosti měření. Různými časy na výplach a plnění nové náplně totiž dochází k různé intenzitě ochlazování vnitřní stěny komory.

Další možností, jak zpřesnit určení OCC by mohlo být používání vzduchu s nižším obsahem kyslíku. Při koncentracích mezi 5 až 10% O_2 dochází k velkému zvýšení průtahu vznícení, což by mělo zlepšit podmíněnost výpočtu OCC. Zvýšení podmíněnosti výpočtu by bylo přínosné hlavně při určování hodnoty OCC paliv s vysokou vznětlivostí.

Všechny případně provedené úpravy zařízení by vyžadovaly provést novou kalibraci, proto by bylo vhodné tyto změny provádět současně a to nejlépe v době před plánovanou kalibrací.

8 POROVNÁNÍ SE ZKUŠEBNÍMI ZAŘÍZENÍMI NA TRHU

Tabulka 8 zobrazuje porovnání jednotlivých zařízení pomocí dostupných technických parametrů. Protože některá kritéria (poruchovost, servis, jednoduchost obsluhy...) je obtížné kvantifikovat, nejsou v tabulce uvedena. Například při posuzování snadnosti obsluhy, by zařízení vyvinuté na TUL nedopadlo nejlépe.

| | Waukesha CFR | Waukesha FIT | AET IQ T | PAC CID 510 | TUL |
|---------------------------------------|---|---|--|---|---|
| |  |  |  |  |  |
| Norma | ASTM D613 EN ISO 5165 | ASTM D7170 IP 567 | ASTM D6890 | ASTM D975, D6757, D7467 | x |
| Zařízení | Zkušební motor | CVCC | CVCC | CVCC | WVCC |
| Od roku | 1938 | ? | 1999 | 2012 | 2009 |
| Měřicí rozsah | dle ref. paliv | 30 – 80 OCČ | 32 - 65 OCČ | 35 - 65 OCČ | 27 - 67 OCČ |
| Vstřikovací tlak [bar] | 103 | 100 | 180 | 1500 1000 | 1600 1000 |
| Náplň | Stlačený vzduch | Stlačený vzduch | Stlačený vzduch | Syntetický vzduch | Syntetický vzduch |
| Teplota náplně | ? | ? | 545 ± 30 °C | Cca 520 °C | Max 650 °C |
| Opakovatelnost @ 55 CČ | 1 | 1,1 | 0,76 | 0,72 | 0,8 |
| Reprodukovatelnost @ 55 CČ | 4,8 | 3,9 | 3,68 | 2,04 | Nelze zjistit |

Tabulka (5): Porovnání technických parametrů různých zařízení.

8.1 Výpočet opakovatelnosti měření na zařízení

K výpočtu opakovatelnosti, byla použita data změřená Bc. Miroslavem Bártou, který se v rámci řešení své bakalářské práce [3] zabýval ověřováním funkčnosti zařízení. V době řešení své BP měl k dispozici jiný prediktivní model (19), než byl určen v kapitole 7 po odevzdání jeho práce. Přehled výsledků ověřovacích měření podle staršího prediktivního modelu je uveden níže (Tabulka 6).

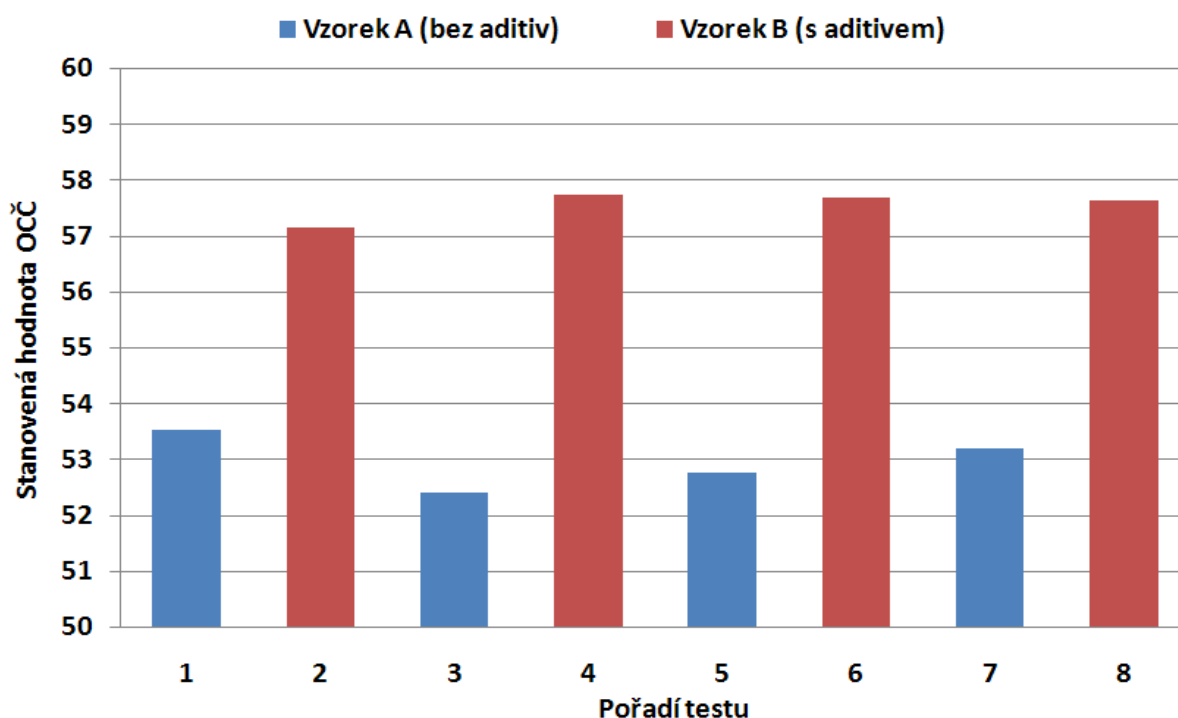
$$OCC = \exp(2,78721 + \frac{2,40034}{pv + 0,0062 * (T_{vnitri} - 540)}) \quad (19)$$

| č. testu | Datum | Poznámky k měření | Odvozené cetanové číslo (OCC) [-] | Rozptyl [-] | Tolerance dle Tab. 4.1 | Rozdíl od předešlého měření v absolutní hodnotě | Výsledek A - ano (vyhovuje) N - ne (nevyhovuje) |
|--|-----------|-------------------|-----------------------------------|-------------|------------------------|---|---|
| Testovaný vzorek paliva: Diesel Extra | | | | | | | |
| 1. | 18.4.2011 | komplet | 55,04 | 0,45 | 1,19 | - | - |
| 3. | 26.4.2011 | 16. chybí | 54,06 | 0,56 | 1,18 | 0,98 | A |
| 5. | 3.5.2011 | komplet | 53,97 | 0,73 | 1,17 | 0,09 | A |
| 7. | 4.5.2011 | komplet | 54,62 | 0,52 | 1,18 | 0,65 | A |
| Testovaný vzorek paliva: Diesel Extra + Aditiv | | | | | | | |
| 2. | 18.4.2011 | komplet | 58,5 | 1,03 | 1,24 | - | - |
| 4. | 26.4.2011 | 29. chybí | 59,24 | 1,13 | 1,25 | 0,74 | A |
| 6. | 3.5.2011 | komplet | 59,28 | 0,34 | 1,25 | 0,04 | A |
| 8. | 4.5.2011 | komplet | 59,34 | 0,63 | 1,26 | 0,06 | A |

Tab. 4.5 Výsledky ověření opakovatelnosti dle normy ASTM D7170-09 a důvěryhodnosti naměřených dat z testů dvou různých paliv.

Tabulka 6: Přehled výsledků získaných při ověřování opakovatelnosti měření. [3]

Proto, že BP [3] obsahovala i zdrojová data, bylo možné určit opakovatelnost stanovení OCC pomocí nového prediktivního modelu. Shrnutí výsledků (Tabulka 7) je doplněno hodnotu opakovatelnosti vypočtenou dosazením do vzorce (20).



Graf 17: Střední hodnoty jednotlivých testů stanovené pomocí nového modelu.

Palivem označeným „vzorek A“ byla motorová nafta zakoupená v dubnu 2011 u jedné z libereckých čerpacích stanic společnosti Shell s označením Diesel Extra. Druhým vzorkem (vzorek B) byla směs stejné nafty (vzorku A) a aditiv s označením Super Diesel Aditiv smíchaná v poměru doporučeném výrobcem aditiva (společnost VIF).

| | vzorek A | vzorek B |
|-----------------------|----------|----------|
| OCČ (1.test) | 53,48 | 57,16 |
| OCČ (2.test) | 52,35 | 57,73 |
| OCČ (3.test) | 52,76 | 57,70 |
| OCČ (4.test) | 53,21 | 57,62 |
| střední hodnota [OCČ] | 52,95 | 57,55 |
| Opakovatelnost [OCČ] | 1,01 | 0,54 |

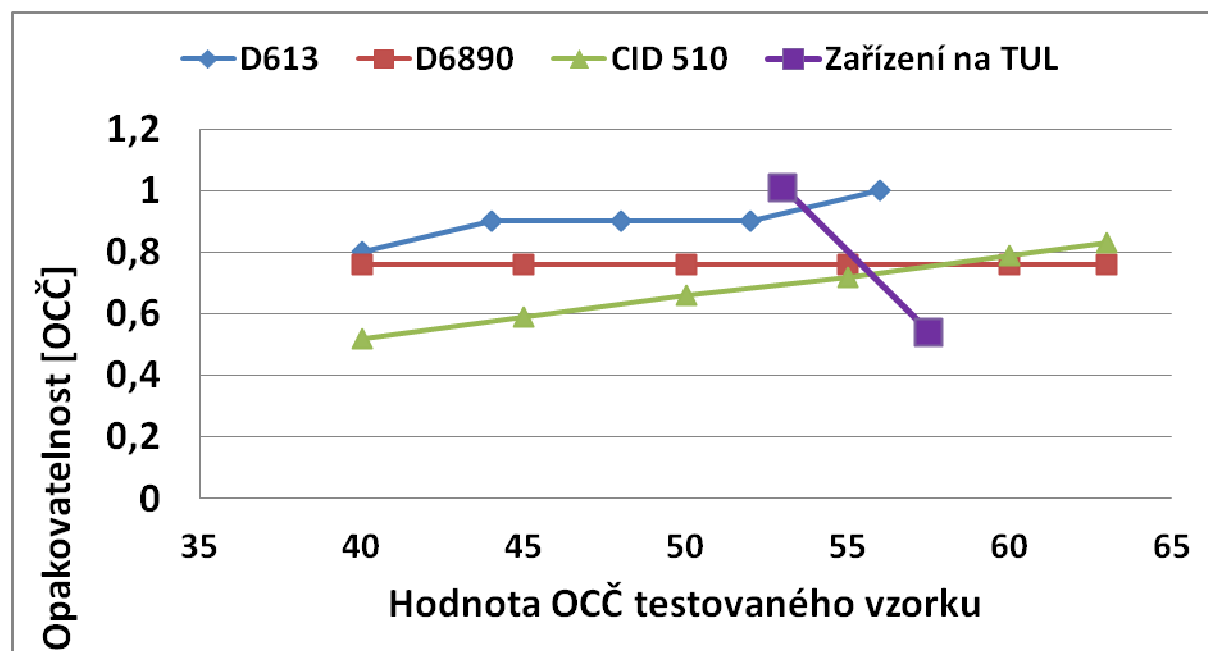
Tabulka 7: Výsledky měření OCČ získané ze zdrojových dat obsažených v literatuře [3].

$$r = t_{(95\%, n-1)} \cdot \sqrt{\frac{\sum (\bar{X} - X_i)^2}{n}} = 2,353 \cdot \sqrt{\frac{\sum (\bar{X} - X_i)^2}{4}} \quad (20)$$

| ASTM D 613 | | | ASTM D 6890 | | | PAC Cetane ID 510 | | |
|---------------------------|-----|-----|---------------------------|------|------|--------------------------|------|------|
| Precision from the method | | | Precision from the method | | | | | |
| DCN | r | R | DCN | r | R | DCN | r | R |
| 40 | 0.8 | 2.8 | 40 | 0.76 | 2.20 | 40 | 0.52 | 1.48 |
| 44 | 0.9 | 3.3 | 45 | 0.76 | 2.70 | 45 | 0.59 | 1.67 |
| 48 | 0.9 | 3.6 | 50 | 0.76 | 3.19 | 50 | 0.66 | 1.86 |
| 52 | 0.9 | 4.3 | 55 | 0.76 | 3.68 | 55 | 0.72 | 2.04 |
| 56 | 1.0 | 4.8 | 60 | 0.76 | 4.18 | 60 | 0.79 | 2.23 |
| | | | 63 | 0.76 | 4.47 | 63 | 0.83 | 2.34 |

Tabulka 8: Porovnání opakovatelnosti a reprodukovatelnosti vybraných metod. [43]

Po vynesení hodnot opakovatelnosti obsažených v tabulce 8 do jednoho grafu (Graf 18) současně s vypočítanými hodnotami opakovatelnosti z měření vzorků „A“ a „B“ je patrné, že v případě zařízení na TUL závislost opakovatelnosti měření na hodnotě OCČ vykazuje opačnou tendenci, než u ostatních zařízení. Neboť se zvyšující se hodnotou OCČ vzorku podmíněnost výpočtu OCČ klesá, bylo by vhodné měření opakovatelnosti provést znovu a to nejlépe s větším počtu vzorků.



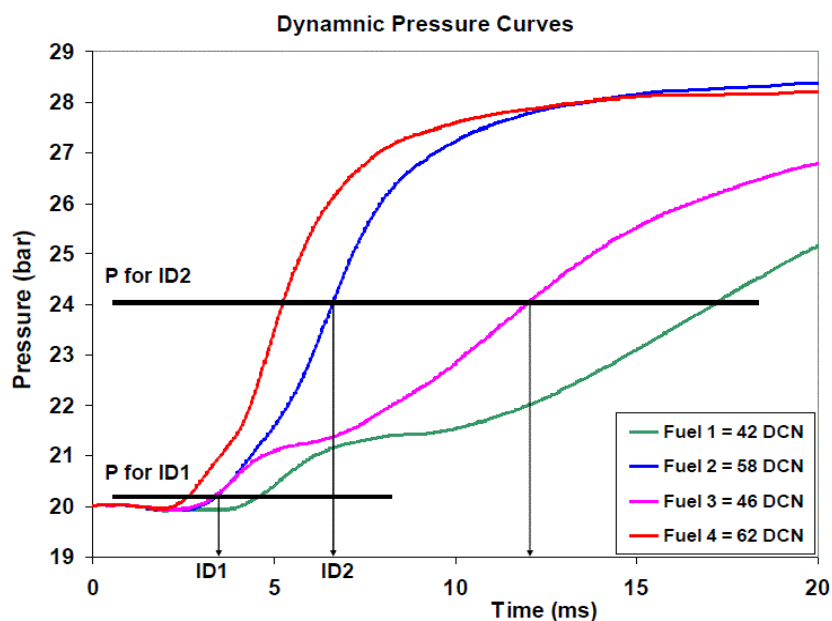
Graf 18: Porovnání opakovatelnosti jednotlivých zařízení.

8.2 Porovnání naměřených průběhů tlaku v komoře na zařízení CID 510 a zařízení vyvinutého na TUL

Výrobce zařízení CID 510 publikuje na svých internetových stránkách příklady průběhů tlaku při testování čtyř vzorků paliv s velmi odlišnými hodnotami cetanového čísla (viz Obrázek 37), na nichž chce vyzdvihnout nedostatečnost vyhodnocení OCC z hodnoty průtahu vznícení stanovené pouze na jedné úrovni přírůstku tlaku (P for ID1). Průběhy naměřených tlaků ukazují i na fakt, že rychlost uvolňování tepla je mnohem menší než u moderních PSM. Například při otáčkách motoru 3000 ot/min (úhlová rychlost 18°KH/ms) by celková doba hoření překročila 180°KH i pro palivo s poměrně vysokou vznětovou charakteristikou (58 OCC). U paliva s 46 OCC by se za stejnou dobu (tj. 180°KH) uvolnila pouze přibližně polovina tepla.

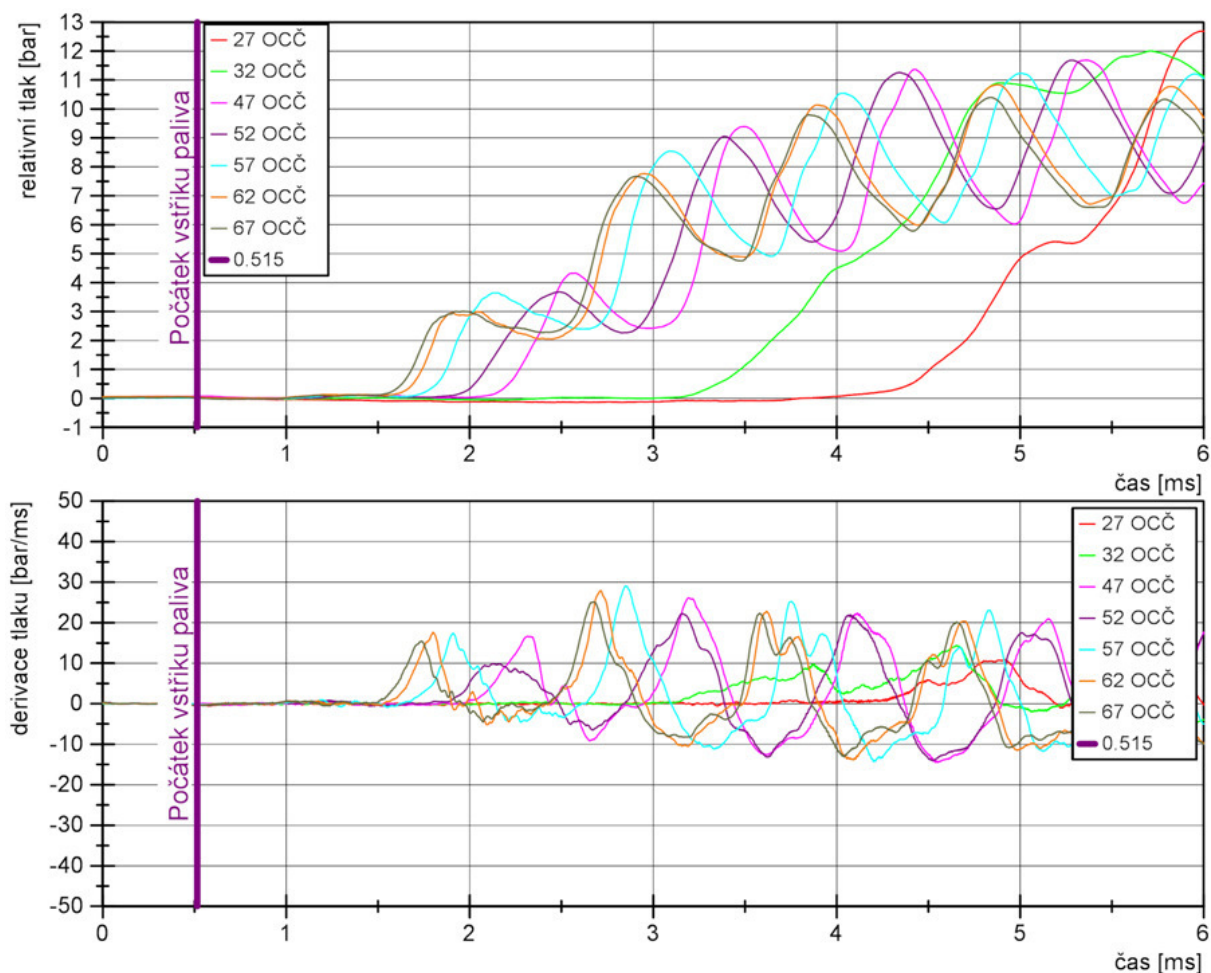
Přes stejnou hodnotu vstřikovacího tlaku a podobné podmínky na počátku vstřiku, je zařízením vyvinutém na TUL naměřen odlišný průběh tlaku, který se vyznačuje mimo jiné kratším průtahem vznícení. Důvodem této odlišnosti, může být jiný tvar komory (velké rozdíly součinitele přebytku vzduchu), jiné rozdíly teplot vnitřních stěn komor od teploty náplně (dané odlišným průběhem plnění komory), jiný objem komory, ale například i jiné umístění snímače tlaku.

Dokonalejšímu pochopení této problematiky by mohla přispět měření s různým objemem komory, s různou prodlevou počátku měření od naplnění komory čerstvým vzduchem atd. K realizaci takovýchto experimentů je zařízení na TUL připraveno.



Obrázek 37: Příklad naměřeného průběhu tlaku v zařízení CID 510. [43]

Pro paliva se vznětlivostí mezi 47 až 67 OCČ se doba průtahu vznícení u vyvinutého zařízení pohybuje v rozmezí jedné až dvou milisekund. Tyto hodnoty průtahu vznícení jsou ze všech porovnávaných zařízení nejnížší a současně nejbližší hodnotám měřeným u vznětových motorů.



Graf 19: Příklady průběhů relativních tlaků z měření referenčních paliv a průběh jejich derivace.

9 ZÁVĚR

Předložená práce nabízí konkrétní technické řešení velmi specifického problému, kterým je stanovení vznětlivosti paliv metodou založenou na měření vznětové charakteristiky paliva vstříknutého do ohřátého stlačeného vzduchu ve spalovací komoře konstantního objemu. Za účelem zpřesnění měření se OCČ paliv nestanovuje na základě měření pouze jedné veličiny (průtahu vznícení), jako je tomu u ostatních obdobných zařízení. Vyvinuté zařízení se dále odlišuje hodnotou maximálního vstřikovacího tlaku (až 1600 barů), která odpovídá moderním palivovým systémům vznětových motorů a svojí hodnotou převyšuje některá zařízení více než 10 krát.

Podstatnou částí práce byla kromě návrhu zařízení k měření OCČ právě jeho realizace, která zahrnovala kromě výroby i zkušební provoz, zdokonalování a v neposlední řadě vývoj metodiky měření. Díky značnému úsilí spojenému s realizací zkušebního zařízení se možná předložená práce v jistých ohledech nemůže porovnávat s pracemi jiných autorů, které nevyžadovaly stavbu vlastní měřicí aparatury, ale „pouze“ tuto aparaturu používaly.

Poměrně velká část práce je věnována popisu aparatury a jejích jednotlivých prvků. Toto je odůvodněno tím, že práce supluje i část provozní dokumentace zařízení a umožňuje uživatelům zařízení porozumět funkci jednotlivých prvků, čehož můžou využít v režimech nestandardního používání (změny vstřikovacích tlaků, velikosti dávky, testování při různých podílech kyslíku v náplni atd.).

Z porovnání jednotlivých zařízení na měření CČ respektive OCČ vyplývá, že technickými parametry je zařízení vyvinuté na TUL nejbližší komerčnímu zařízení CID 510. Obě tato zařízení jako jediná používají vstřikovač paliva z moderních vstřikovacích systémů „common rail“ a také běžných vstřikovacích tlaků těchto systémů (1000 bar). Další shodou je použití syntetického vzduchu namísto vzduchu atmosférického, to může napomáhat zařízení CID 510 k nejlepší reprodukovatelnosti výsledků na trhu. Fakt, že stavba zařízení byla na TUL dokončena v roce 2009, ale vyvrací možnost, že by byl návrh zařízení na TUL inspirován zařízením CID 510.

Mírně horší opakovatelnost výsledků vyvinutého zařízení je vyvážena jednak jeho pořizovacími náklady, které nepřekračují 5% pořizovacích nákladů CID 510 (přibližně 5 miliónů Kč), ale také vysokou variabilitou a poměrně jednoduchou, čitelnou konstrukcí, která spolu s použitým řídicím systémem dovoluje mnohé kombinace nastavení a zdokonalení. Jako jediné z porovnávaných zařízení umožňuje změnu objemu komory, měření tlaku na obou čelech komory a také použití vizualizační techniky ke sledování postupu hoření, kterou KVM disponuje. Tyto výhody jsou zvláště významné v kontextu

charakteru použití. Laboratoře motorů TUL neslouží k provádění rutinních testů se snahou ušetřit několik Euro centů na 1000 litrů paliva, ale představují živé kreativní prostředí, v kterém podobná zařízení mohou najít široké uplatnění.

Práce obsahuje i návrhy některých zlepšení, která vycházejí až z analýzy naměřených dat a na jejichž realizaci již nezbýval čas. Přínosná může být i pro řadu čtenářů, kteří se jako dílčím cílem své práce zabývají řešením vícerozměrné nelineární statistiky a hledají jiné než konvenční metody řešení. Navržená nederivační metoda výpočtu umožňuje poměrně jednoduchým způsobem najít lokální extrémy nelineárních funkcí s vyšším množstvím proměnných. V práci byla tato metoda použita k nalezení optimální kombinace šesti hledaných parametrů prediktivního modelu. Posuzovaným kritériem byla suma čtverců odchylek hodnoty OCČ referenčních paliv od hodnoty OCČ predikované modelem.

Lze konstatovat, že vytyčené cíle doktorské disertační práce byly splněny.

Literatura

- [1] ALLARD, L. N., WEBSTER, G. D., RYAN III, T. W., BAKER, G., BERECSZASZY, A., FAIRBRIDGE, C. W., ECKER, A., RATH, J. Analysis of the Ignition Behaviour of the ASTM D-613 Primary Reference Fuels and Full Boiling Range Diesel Fuels in the Ignition Quality Tester (IQTTM) – Part III. *SAE Technical Paper Series*, October 1999. ISSN 0148-7191.
- [2] ARADI, A., A., RYAN III, T., W. Cetane Effect on Diesel Ignition Delay Times Measured in a Constant Volume Combustion Apparatus. *SAE Technical Paper Series*, 1995. ISSN 0148-7191.
- [3] BÁRTA, M. *Vznětlivost motorových paliv*. Liberec, 2011. 59 s. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní. Vedoucí bakalářské práce Laurin, J.
- [4] BEROUN, S., SCHOLZ, C., BLAŽEK, J. Parametry hoření motorových paliv ve válci pístových spalovacích motorů. *Medzinárodné sympóziu motorové palivá 2002*. Bratislava: Slovnaft, 2002.
- [5] BEROUN, S., Páv, K. Analýza postupného hoření v uzavřeném konstantním objemu. Technická zpráva.
- [6] BEROUN, S. Analýza spalovacího procesu v PSM. Studijní materiál.
- [7] BEROUN, S. Iniciační hoření směsi ve válci motoru ve vznětovém a zážehovém motoru, význam počáteční rychlosti hoření na stabilitu průběhu hoření. Studijní materiál.
- [8] BEROUN, S. Rozložení teplot spalín při postupném hoření směsi v uzavřeném objemu. Studijní materiál.
- [9] BEROUN, S. Spalovací proces v pístových spalovacích motorech – Wiebeho zákon hoření. Studijní materiál.
- [10] BEROUN, S. Termodynamika pracovního oběhu PSM, spalovací proces v PSM. Studijní materiál.
- [11] BEROUN, S. Vznícení a hoření heterogenních směsí, vznícení homogenních směsí. Studijní materiál.
- [12] BURKE, S. *Statistics in context: Exploring and summarising the results of measurements*. VAM Bulletin, 1997.

- [13] ČÁP, J., KREMLÁČEK, P. Pressure control in BOSCH Common Rail injection system. *The 20th International Conference on Hydraulics and Pneumatics*. Prague, October 2007.
- [14] DIMITRIU, D. G., GOETTLER, H. J., ZIEJEWSKI, M. Apparatus for the Measurement of Ignition Delay Times for Diesel Engine Fuels. *SAE Technical Paper Series*, 1990. ISSN 0148-7191.
- [15] DVOŘÁK, J. Modelování průběhu tlaku ve spalovací komoře zařízení ke stanovení OCČ paliv. Technická zpráva.
- [16] ĎAĎO, S., KREIDL, M. *Senzory a měřicí obvody*. Praha: ČVUT, 1996. 315 s. ISBN 80-01-01500-9.
- [17] EL-WAKIL, M. M., ABDOL, M. I. The Self Ignition of Fuel Drops in Heated Air Streams. *SAE Technical Paper Series*, 2003.
- [18] FREEDMAN, B., BAGBY, M. O., CALLAHAN, T. J., RYAN, T. W. Cetane Numbers of Fatty Esters, Fatty Alcohols and Triglycerides Determined in a Constant Volume Combustion Bomb. *SAE Technical Paper Series*, 1990. ISSN 0148-7191.
- [19] KOIZUMI, I., KITAOKA, Y. Spontaneous Ignition Delay of Fuel Spray Injected into a Gas Stream. *Bulletin of JSME*, 1962, Vol. 5, No. 20, pp. 719 - 727.
- [20] MARHOLD, K., SUDA, J. *Statistické zpracování mnohorozměrných dat v taxonometrii*. Praha: Karolinum, 2002.
- [21] MATĚJOVSKÝ, V. *Automobilová paliva*. Grada Publishing a. s., 2004. 228 s. ISBN 80-247-0350-5.
- [22] MELOUN, M., MILITKÝ, J. *Kompendium statistického zpracování dat. Metody a řešené úlohy včetně CD*. Praha: Academia, 2002. 776 s. ISBN 80-200-1008-4.
- [23] MELOUN, M., MILITKÝ, J., HILL, M. *Počítačová analýza vícerozměrných dat v příkladech*. 1. vyd. Praha: Academia, 2005. 450 s. ISBN 80-200-1335-0.
- [24] MELOUN, M., MILITKÝ, J. *Statistická analýza experimentálních dat*. 2. vyd. Praha: Academia, 2004. 953 s. ISBN 80-200-1254-0.
- [25] METCALF, O. J., SWARTS, A., YATES, A. A Study of the Ignition-Delay Character of n-Heptane in the IQTTM Combustion Bomb Using CFD Modelling. *SAE Technical Paper Series*, 2007. ISSN 0148-7191.

- [26] MURPHY, M. J., TAYLOR, J. D., McCORMICK, R. L. *Compendium of Experimental Cetane Number Data*. United States, 2004. Technical report number, NREL/SR-540-36805, KAF-9-29764-23.
- [27] RYAN III, T. W., STAPPER, B. Diesel Fuel Ignition Quality as Determined in a Constant Volume Combustion Bomb. *SAE paper No. 870586*, February 1987.
- [28] RYAN III, T. W., CALLAHAN, T. J. Engine and Constant Volume Bomb Studies of Diesel Ignition and Combustion. *SAE paper No. 881626*, October 1988.
- [29] RYAN III, T. W. Correlation of Physical and Chemical Ignition Delay to Cetane Number. *SAE paper No. 852103*, October 1985.
- [30] SIEBERS, D. L. Ignition Delay Characteristics of Alternative diesel Fuels: Implications on Cetane Number. *SAE Technical Paper Series 852102*, 1985.
- [31] TAKEDA, A., HITARA, F., OTSUKA, A., HAGIWARA, A., MIYANO, H., NATAKANI, H., SHIMIZU, E., URA, T., KATO, T., SUZUKI, D. Combustion Quality of Marine Residual Fuels Measured by Constant Volume Combustion Chamber Method. *SAE Technical Paper Series*, 2005.
- [32] WIKIPEDIE [online]. 25. 8. 2016. Dostupný z:
<https://cs.wikipedia.org/wiki/cetanove_cislo>.
- [33] WILLIAMS, K. P. J., ARIES, R. E., CUTLER, D. J., LIDIARD, D. P. Determination of Oil Cetane Number and Cetane Index Using Near-Infrared Fourier Transform Raman Spectroscopy. *Analytical Chemistry*, december 1990. ISSN 0003-2700.
- [34] ZHENG, Z., BADAWY, T., HENEIN, N., SATTLER, E. Investigation of Physical and Chemical Delay Periods of Different Fuels in the Ignition Quality Tester (IQT). Detroit: Wayne State University, November 2012. W56HZV-04-2-0001.
- [35] ZVOLSKÝ, T. *Návrh měřicího a řídicího systému pro zjišťování vznětlivosti motorových paliv*. Liberec, 2007. 64 s. Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií. Vedoucí diplomové práce Svoboda, M.

Firemní literatura

- [40] AET (Advanced Engine Technology) [online]. 22. 8. 2016. Dostupné z:
< <http://www.aet.ca/index.php?section=20>>.
- [41] AET Procedures Manual: Ignition Quality Tester (IQT™) for Diesel Fuel Cetane Number Evaluation, Advanced Engine Technology (AET), August 2003.
- [42] MINITAB, Minitab inc., Quality Plaza, 1829 Pine Hall Road, State College, USA.
- [43] PAC [online]. 22. 8. 2016. Dostupné z:
< http://www.paclp.com/lab_instruments/cid_510_-_cetane_ignition_delay/ >.
- [44] Robert Bosch GmbH: Elektronické řízení a regulace – Aktivace vstřikovacích systémů řízených elektromagnetickým ventilem, 2004. Technická zpráva.
- [45] Waukesha CFR [online]. 22. 8. 2016. Dostupné z:
<<http://www.waukeshacfr.com/fit/>>.
- [46] Waukesha CFR [online]. 22. 8. 2016. Dostupné z:
<<http://www.waukeshacfr.com/f-5/>>.

Technické normy, směrnice

- [50] ASTM D 6890-08 Standard Test Method for Determination of Ignition Delay and Derived Cetane Number (DCN) of Diesel Fuel Oils by Combustion in a Constant Volume Chamber.
- [51] ASTM D 613-08 Standard Test Method for Cetane Number of Diesel Fuel Oil.
- [52] ASTM D 7170-09 Standard Test Method for Determination of Derived Cetane Number (DCN) of Diesel Fuel Oils-Fixed Range Injection Period, Constant Volume Combustion Chamber Method.
- [53] ČSN EN 590 Motorová paliva - Motorové nafty – Technické požadavky a metody zkoušení.
- [54] ČSN EN ISO 5165 Ropné výrobky – Stanovení cetanového čísla motorové nafty – Motorové metody.

Vlastní publikace autora

- [60] HOLUBEC, R., MAREŠ, J. The Future of LPG as a Transport Fuel, LPT Fuel Systems. *12th International LPG and CNG Gas Forum 2008*. Varšava, 2008.
- [61] HOLUBEC, R., MAREŠ, J., BEROUN, S., BLAŽEK, J., VENCL, M. Vlastnosti vozidlového zážehového motoru při provozu na alternativní paliva CNG a LPG. *Mezinárodní konference Motorová paliva 2008*. ISBN 978-80-969710-2-2.
- [62] HOLUBEC, R., LAURIN, J. Motorová paliva z rostlinných olejů. 8. vědecká mezinárodní konference - *Přírodní zdroje doprava, energetika a udržitelný hospodářský růst*, ČVUT: Praha, 2008. ISBN 978-80-01-04053-9.
- [63] HOLUBEC, R., NOVÁKOVÁ, Š. Fire Safety at Storage and Transport of the Hydrogen. *Konference Věda a krizové situace. Liberec, 2007*.
- [64] HOLUBEC, R. Zařízení na měření cetanového čísla paliv pro vznětové motory. *Studentská vědecká a odborná činnost SVOČ 2010*. Liberec, 2010. ISBN 978-80-7372-601-0.
- [65] HOLUBEC, R., VOJTÍŠEK, M. Combustion of non-esterified rapeseed oil with ethylhexylnitrate (EHN) as a cetane number improving agent in a tractor diesel engine. *International Doctoral Seminar*, 2010. Smolenice, Slovenská republika, 2010.
- [66] HOLUBEC, R., LAURIN, J. Zařízení k měření cetanového čísla paliv. XL. *International scientific conference KOKA 2009*. Nitra, Slovenská republika, 7. - 8. 9. 2009.
- [67] HOLUBEC, R., LAURIN, J. Funkční vzorek zařízení k zjišťování cetanového čísla paliv pro vznětové motory. Technická zpráva, TUL. Liberec, 2009.
- [68] HOLUBEC, R., Snímač zbytkových momentů brzd.
Svět Vývoje (Časopis technického centra TRW), Jablonec nad Nisou, 02/2015.
- [69] LAURIN, J., HOLUBEC, R. The Effects of Biocomponent Blends with Diesel Fuel on Diesel Engine Emissions.
- [70] VOJTÍŠEK-LOM, M., HOLUBEC, R., STARÝ, P., BARBOLLA, A., DITTRICH, L., PECHOUT, M., DRÁB, O. On the Fate of Uncombusted Vegetable Oil in a Diesel Engine. *Sborník 14th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles*. Zurich, Švýcarsko, 2. - 4. 8.2010. ISBN 978-3-033-02531-8.

- [71] VOJTÍŠEK-LOM, M., RÉBLOVÁ, Z., HOLUBEC, R., STARÝ, P. On the Effects of a Fuel-Born DPF Regeneration Catalyst on Vegetable Oil Used as a Diesel Engine Fuel. *Sborník 14th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles*. Zurich, Švýcarsko, 2. - 4. 8. 2010. ISBN 978-3-033-02531-8.
- [72] VOJTÍŠEK-LOM, M., LAURIN, J., BARBOLLA, A., HOLUBEC, R., STARÝ, P. Spalování směsi etanolu s rostlinným olejem ve vznětových motorech. *Listy cukrovarnické a řepařské 2011*.

Příloha 1 (Makro k získání parametrů A až F)

```

Dim lastRow As Double
lastRow = ActiveSheet.Cells(Rows.Count, "S").End(xlUp).Row

Dim i As Integer
Dim X As Double
Dim A As Double
Dim B As Double
Dim C As Double
Dim D As Double
Dim E As Double
Dim F As Double
Dim minOdchylek As Double
Dim Aprom As Double
Dim Bprom As Double
Dim Cprom As Double
Dim Dprom As Double
Dim Eprom As Double
Dim Fprom As Double
Dim Odchylka As Double
Dim SumaOdchylek As Double

minOdchylek = 10000
SumaOdchylek = 0

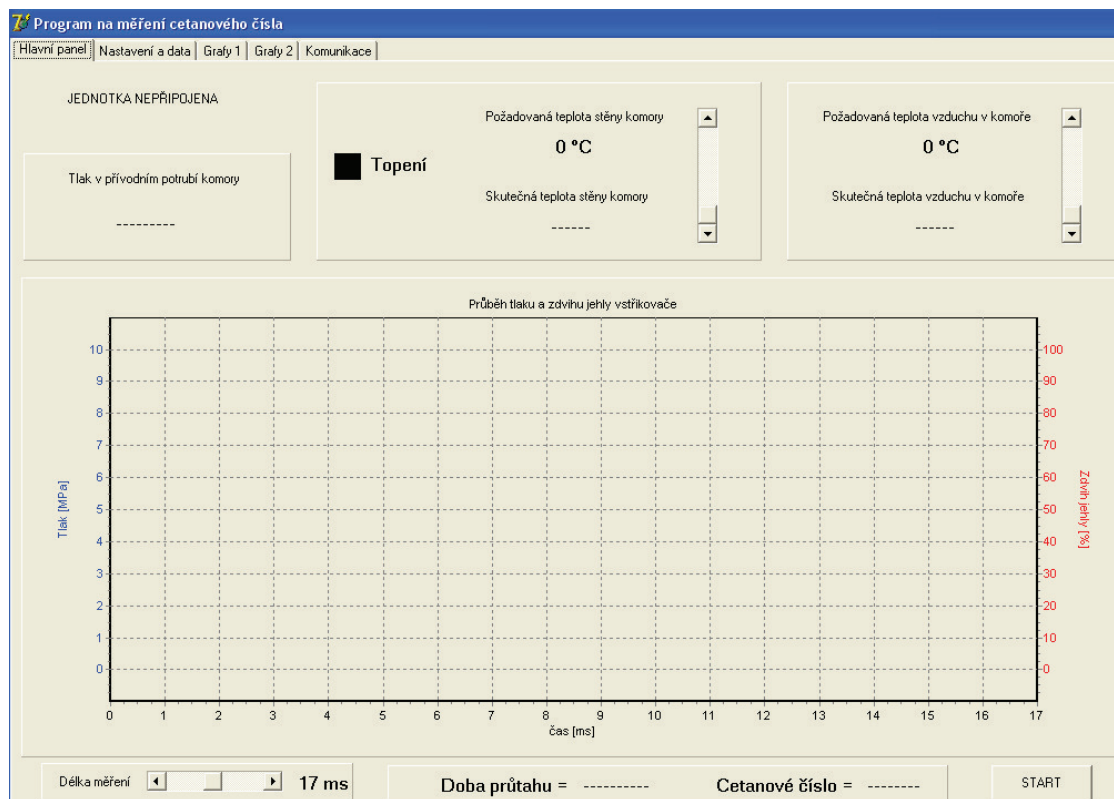
For Aprom = ActiveSheet.Cells(3, "Y") To ActiveSheet.Cells(4, "Y") Step ActiveSheet.Cells(5, "Y")
    For Bprom = ActiveSheet.Cells(3, "Z") To ActiveSheet.Cells(4, "Z") Step ActiveSheet.Cells(5, "Z")
        For Cprom = ActiveSheet.Cells(3, "AA") To ActiveSheet.Cells(4, "AA") Step ActiveSheet.Cells(5, "AA")
            For Dprom = ActiveSheet.Cells(3, "AB") To ActiveSheet.Cells(4, "AB") Step ActiveSheet.Cells(5, "AB")
                For Eprom = ActiveSheet.Cells(3, "AC") To ActiveSheet.Cells(4, "AC") Step ActiveSheet.Cells(5, "AC")
                    For Fprom = ActiveSheet.Cells(3, "AD") To ActiveSheet.Cells(4, "AD") Step ActiveSheet.Cells(5, "AD")
                        For i = 3 To lastRow
                            If ((Not IsEmpty(ActiveSheet.Cells(i, "H"))) And (Not IsEmpty(ActiveSheet.Cells(i, "N"))) And (Not IsEmpty(ActiveSheet.Cells(i, "Q")))) Then
                                X = Fprom * (Exp(Aprom + (Bprom / (ActiveSheet.Cells(i, "Q") + Cprom * ((ActiveSheet.Cells(i, "N") + ActiveSheet.Cells(i, "H") * Eprom) - Dprom))))
                                Odchylka = (ActiveSheet.Cells(i, "S") - X) ^ 2
                                SumaOdchylek = SumaOdchylek + Odchylka
                                ' Cells(17, "J") = Fprom
                                ' Cells(18, "J") = Eprom
                                ' Cells(19, "J") = Dprom
                                ' Cells(20, "J") = Cprom
                                ' Cells(21, "J") = Bprom
                                ' Cells(22, "J") = Aprom
                            End If
                        Next
                    Next
                Next
            Next
        Next
    Next
Next
If SumaOdchylek < minOdchylek Then
    minOdchylek = SumaOdchylek
    A = Aprom
    B = Bprom
    C = Cprom
    D = Dprom
    E = Eprom
    F = Fprom
End If
SumaOdchylek = 0

Next
Next
Next
Next
Next
Next

ActiveSheet.Cells(6, "Y") = A
ActiveSheet.Cells(6, "Z") = B
ActiveSheet.Cells(6, "AA") = C
ActiveSheet.Cells(6, "AB") = D
ActiveSheet.Cells(6, "AC") = E
ActiveSheet.Cells(6, "AD") = F
'Application.ScreenUpdating = True
End Sub

```

Příloha 2 („Hlavní“ záložka a záložka „Nastavení“ programu pro počítač)



Program na měření cetanového čísla

Hlavní panel | **Nastavení a data** | Grafy 1 | Grafy 2 | Komunikace

Doba pročištění spalovací komory [ms] 0 max 3000

Doba plnění pneuválce [ms] 0 max 1000

Doba rozběhu [ms] 0 max 5,0

Doba vstřiku [ms] 3 max 10,0

Doba vyprazdňování pneuválce [ms] 0 max 1000

Doba otevření ventilu výstupu spalín [s] 10 max 300

Konstanta čidla zdvihu jehly [počet dílků AD/100%] 46000

Konstanta čidla tlaku [pC/bar] 36,52

Úroveň signálu pro zjištění počátku zdvihu jehly [%] 5

Úroveň signálu pro zjištění počátku růstu tlaku [MPa] 0,5

BaudRate: 115 200 COM 1

Databits: 8 COM 2

Stopbit: 1 COM 3

Parity: None COM 4

☒ Krátká časová konstanta

☒ Automatická kompenzace vstupní nesymetrie

☐ Přenos dat bez vstřikování a měření

☐ Měření bez vstřikování

Doba od zapnutí jednotky: -----

Celková doba provozu jednotky: -----

Příloha 3: Tabulka směšovacích poměrů sekundárních referenčních paliv „T-24“ a „U-17“

Chevron Phillips Chemical Company LP

Chevron Phillips Chemical Company LP
10001 Six Pines Drive
The Woodlands, TX 77380
800-858-4327
Technical Service: 832-813-4862

Chevron Phillips Chemicals International N.V.

Brusselsesteenweg 355
B-3090 Overijse, Belgium
+32 (0) 2 689 12 11

Chevron Phillips Chemicals Asia PTE Ltd

5 Temasek Boulevard
05-01 Suntec Tower Five
Singapore 038985
+65 6337 9700

**Specialty
Chemicals**

ASTM Subcommittee D 02.01 on Combustion Characteristics Cetane Number Calibration for Diesel Secondary Reference Fuels T-24 Blended with U-17 by Volume

| %T-24 to U-17 | Cetane Number | %T-24 to U-17 | Cetane Number | %T-24 to U-17 | Cetane Number |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 0 | 19.5 | 34 | 38.4 | 68 | 57.2 |
| 1 | 20.1 | 35 | 38.9 | 69 | 57.8 |
| 2 | 20.6 | 36 | 39.5 | 70 | 58.3 |
| 3 | 21.2 | 37 | 40.0 | 71 | 58.9 |
| 4 | 21.7 | 38 | 40.6 | 72 | 59.4 |
| 5 | 22.3 | 39 | 41.1 | 73 | 60.0 |
| 6 | 22.8 | 40 | 41.7 | 74 | 60.5 |
| 7 | 23.4 | 41 | 42.2 | 75 | 61.1 |
| 8 | 23.9 | 42 | 42.8 | 76 | 61.7 |
| 9 | 24.5 | 43 | 43.4 | 77 | 62.2 |
| 10 | 25.1 | 44 | 43.9 | 78 | 62.8 |
| 11 | 25.6 | 45 | 44.5 | 79 | 63.3 |
| 12 | 26.2 | 46 | 45.0 | 80 | 63.9 |
| 13 | 26.7 | 47 | 45.6 | 81 | 64.4 |
| 14 | 27.3 | 48 | 46.1 | 82 | 65.0 |
| 15 | 27.8 | 49 | 46.7 | 83 | 65.5 |
| 16 | 28.4 | 50 | 47.2 | 84 | 66.1 |
| 17 | 28.9 | 51 | 47.8 | 85 | 66.6 |
| 18 | 29.5 | 52 | 48.3 | 86 | 67.2 |
| 19 | 30.0 | 53 | 48.9 | 87 | 67.8 |
| 20 | 30.6 | 54 | 49.5 | 88 | 68.3 |
| 21 | 31.2 | 55 | 50.0 | 89 | 68.9 |
| 22 | 31.7 | 56 | 50.6 | 90 | 69.4 |
| 23 | 32.3 | 57 | 51.1 | 91 | 70.0 |
| 24 | 32.8 | 58 | 51.7 | 92 | 70.5 |
| 25 | 33.4 | 59 | 52.2 | 93 | 71.1 |
| 26 | 33.9 | 60 | 52.8 | 94 | 71.6 |
| 27 | 34.5 | 61 | 53.3 | 95 | 72.2 |
| 28 | 35.0 | 62 | 53.9 | 96 | 72.7 |
| 29 | 35.6 | 63 | 54.4 | 97 | 73.3 |
| 30 | 36.1 | 64 | 55.0 | 98 | 73.9 |
| 31 | 36.7 | 65 | 55.6 | 99 | 74.4 |
| 32 | 37.3 | 66 | 56.1 | 100 | 75.0 |
| 33 | 37.8 | 67 | 56.7 | | |

Revised: 12/16/08

NOTE: Secondary Reference Fuels T-24 and U-17 are available from Chevron Phillips Chemical Company, LP. These two secondary reference fuels are used in preparing reference cetane number blends in testing diesel fuels by ASTM D-613. Secondary reference fuel blends must be only from these two fuels. Do not blend either of these fuels with an earlier batch of T or U. The data presented herein is from the ASTM Subcommittee D02.01 Section E on Reference Materials and is based on round-robin certification tests performed by the Diesel National Exchange Group.

Příloha 4/Strana 1: Postup měření [3]

3. POSTUP MĚŘENÍ NA ZAŘÍZENÍ

Před každým novým měřením je potřeba propláchnout palivovou soustavu větším množstvím paliva a tím pádem zajistit, aby následné měřené palivo nebylo neovlivněno zbytky původně měřeného paliva. Pokud začínáme na zařízení měřit, je vše vypnuté a komora není zahřátá, tak je pro úsporu času vhodné provést zároveň během výplachu zařízení zahřátí komory odporovými topnými tělesy. Jestli-že měříme za sebou dva a více vzorků paliva tak je proplach palivové soustavy obdobný, akorát komoru máme zahřátou z předešlého měření a na začátku proplachu musí být vypnuté podávací a vysokotlaké čerpadlo.

Postup měření je popsán jako sled operací jdoucích za sebou. Pro dosažení stabilních a správných výsledků je důležité dodržovat daný postup. Pokud je mezi jednotlivými kroky odstavec, řeší se aktuální problém, je vložena informace či další postup mezi očíslovanými kroky. Postup je pro upřesnění a znázornění doplněn o schéma a fotodokumentaci s popisem zařízení. V textu je na tyto schéma či fotodokumentace s popisem odkazováno následným vysvětlením:

Např.: (obr. 1.6, [2]).....Obrázek 1. kapitoly č. 6, pozice [2]

(obr. 1.6, [2] a [4])...Obrázek 1. kapitoly č. 6, dle pořadí k příslušnému textu
pozice [2] a [4]

Pokud není takto odkazováno, pozice jsou zřejmé nebo se krok vztahuje na odkaz obrázku u názvu podkapitoly.

3.1 Zahřátí vysokotlaké komory

Z levé strany zařízení se nachází hlavní panel, na kterém jsou dva, pro nás důležité vypínače. Hlavní vypínač (obr. 3.6, [1]) zapneme pootočením do polohy 1, tím se zapne elektrický obvod a okruh chlazení a zeleným tlačítkem START zapneme ovládání vysokotlakého čerpadla. Před vysokotlakou komorou je umístěna bílá jednotka (obr. 3.6, [7]) pro regulaci teploty topných těles. Červeným vypínačem zapneme a pootočíme dvěma teplotními regulátory směrem doleva (obr. 3.6, [8]). Maximální pootočení je naznačeno ryskou. Z důvodu rizika teplotního poškození topných těles se nedoporučuje nastavovat regulátory na vyšší hodnotu. Celková doba zahřátí komory je cca 30min. Hlavní řídicí jednotku zapneme také, červeným vypínačem na její levé straně z pohledu z místa ovládání (obr. 3.6, [3]). Oranžovým

Příloha 4/Strana 2: Postup měření [3]

vypínačem (obr. 3.4, [2]) zapneme ovládání DRV ventilu. Dále potřebujeme multimetr na nastavení vstřikovacího tlaku. Od DRV ventilu vedou kabely - černý, červený a žlutý. Na černý a žlutý kabel připojíme multimetr, který je nastaven na měření stejnosměrného napětí. Tlak ve vysokotlakém zásobníku paliva je plynule regulovatelný DRV ventilem, který je napájen PWM signálem v rozmezí 0 – 12V. Teoretický tlak 0 bar odpovídá napětí 0,5 V a tlak 2000 bar odpovídá 4,5 V. Na proplach vstřikovače budeme potřebovat tlak minimálně 300bar. Po zapnutí podávacího a následně vysokotlakého čerpadla je možné nastavit tlak v railu. Postačí, když na zdroji nastavíme pomocí multimetru 1,5 V což nám zajistí tlak 500bar.

3.2 Výměna paliva a výplach (obr. 3.4)

Zde máme 2 možnosti. K proplachu palivové soustavy použijeme palivo, které může být například heptan či toulén. Druhá možnost je propláchnout palivovou soustavu palivem, které budeme právě měřit. Celkový objem palivové soustavy je cca 0,05 litru, k proplachu nám postačí 0,5 litru paliva. Na samotné měření se spotřebuje paliva minimálně, s 1 litrem paliva v nádrži dokážeme dobře propláchnout soustavu a zároveň provést jeho měření.

Jako první krok provedeme vypuštění starého paliva z nádrže do odpadní nádrže. Je potřeba se držet uvedeného postupu při proplachování, aby všechny palivové větve byly důkladně propláchnuty a tím zbaveny zbytků po předešlém palivovém vzorku, jinak může dojít k ovlivnění některých vlastností následného měřeného vzorku paliva.

Od nádrže jsou za sebou zařazená čerpadla podávací a vysokotlaké. Je velice důležité kontrolovat, jak při výměně paliva, tak i při samotném měření, jestli není nádrž vyprázdněná nebo omylem uzavřený kohout A. Pokud toto nebude dodrženo, může se vysokotlaké čerpadlo poškodit z důvodu běhu naprázdno. Zároveň je třeba dávat pozor na zapínání a vypínání čerpadel. Pokud má být vysokotlaké čerpadlo stále mazáno, tak při zapínání jako první spustíme podávací a pak teprve vysokotlaké čerpadlo. Při vypínání nejdříve vypínáme vysokotlaké a následně vypneme podávací čerpadlo. Dále je potřeba se vyvarovat přímého kontaktu s vysokotlakou komorou, její stěny při měření dosahují teploty okolo 770 °C.

Příloha 4/Strana 3: Postup měření [3]

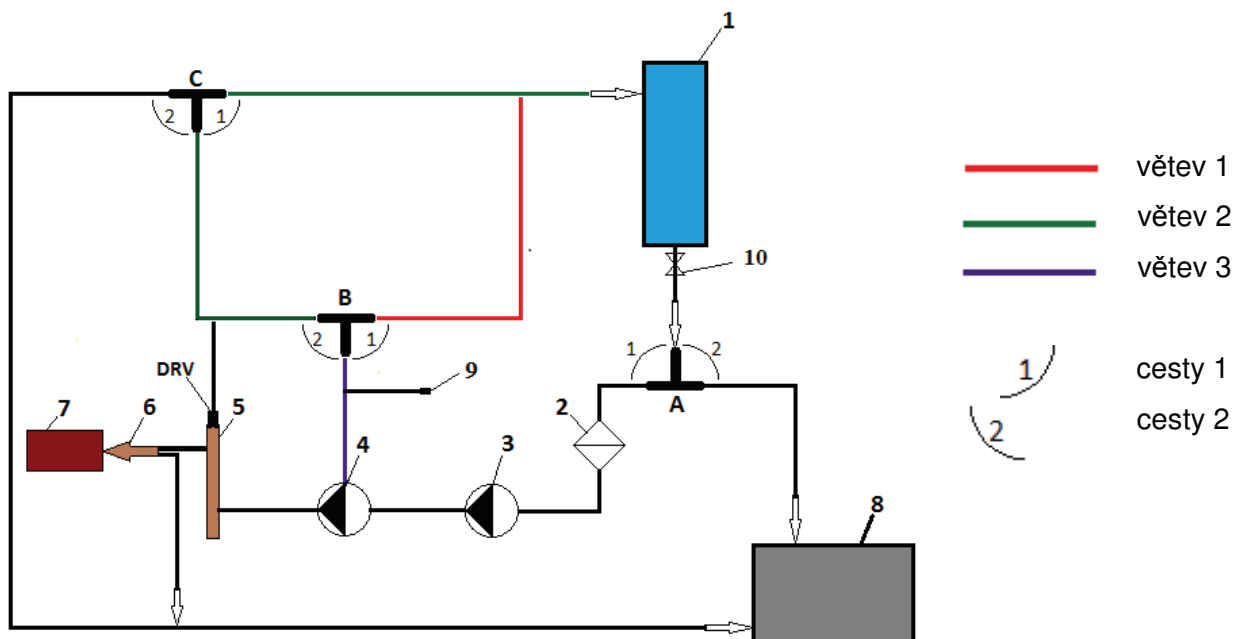
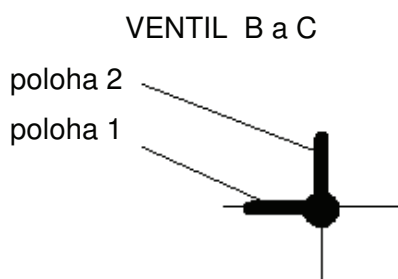


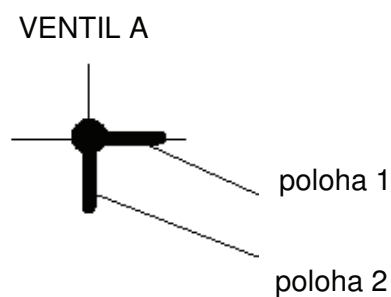
Schéma proplachu zařízení

- 1 - Nádrž na měřený vzorek paliva,
- 2 - palivový filtr,
- 3 - podávací čerpadlo,
- 4 - vysokotlaké čerpadlo,
- 5 – rail,

- 6 – vstřikovač,
- 7 - vysokotlaká spalovací komora,
- 8 - odpadní nádrž,
- 9 – vstup na profuk vzduchem,
- 10 – kohout A.



Poloha ventilů B a



Poloha ventilu A

3.2.1 Vypuštění původního paliva: (obr. 3.4)

- 1) Podávací a vysokotlaké čerpadlo musí být vypnuté (obr. 3.6, [5] a [2])
- 2) Ventil A nastavíme do polohy 2 (tím se otevře cesta 2 a z nádrže se palivo vypustí do odpadní nádrže)

Příloha 4/Strana 4: Postup měření [3]

- 3) Kohout A otevřeme, vyčkáme, až z nádrže vyteče všechno původní palivo do odpadní nádrže
- 4) Ventil B a C nastavíme do polohy 1
- 5) Profoukneme vzduchem větve 1 (profukování vzduchem může být provedeno ruční pumpičkou, nejlépe dvoucestnou)
- 6) Ventil B nastavíme do polohy 2
- 7) Profoukneme vzduchem větve 2

3.2.2 Postup pro výplach novým palivem: (obr. 3.4)

- 1) Uzavřeme kohout A
- 2) Ventil A nastavíme do polohy 1 (otevřeme cestu palivu z nádrže k podávacímu čerpadlu)
- 3) Ventily B a C nastavíme do polohy 2 (palivo bude odtékat do odpadní nádrže)
- 4) Prázdnou palivovou nádrž musíme důkladně vytříť od zbytků původního paliva (postačí papírový ubrousek)
- 5) Nyní naplníme nádrž novým měřeným palivovým vzorkem (1 litr paliva postačí na důkladné propláchnutí zařízení a na samotné měření). Objem palivové nádrže je 2 litry.
- 6) Otevřeme kohout A.
- 7) Nyní zapneme podávací čerpadlo (obr. 3.6, [5]) (vysokotlaké čerpadlo je vypnuté) a propláchneme větve 3 novým palivem, k proplachu postačí cca 2dl paliva.
- 8) Za běhu podávacího čerpadla nastavíme ventil B do polohy 1.
- 9) Spustíme vysokotlaké čerpadlo zeleným tlačítkem (obr. 3.6, [2]) a na DRV ventil nepřivádíme žádné napětí, propláchneme rail, postačí cca 3dl.
- 10) Vypneme vysokotlaké a následně vypneme podávací čerpadlo.

Nyní máme propláchnuté všechny větve zařízení, zbývá propláchnout vstřikovač. Aby se palivo při proplachování vstřikovače nedostalo do vysokotlaké komory je potřeba povolit dva imbus šrouby (obr. 3.5, [3]), které spojují vstřikovač s komorou a od vstřikovače komoru odtáhnout po rámu na kterém je posuvně uložena. Při manipulaci s komorou je potřeba dávat pozor, aby se nepoškodilo její příslušenství a hlavně aby se nepoškodil vstřikovač.

Příloha 4/Strana 5: Postup měření [3]

Na vstřikovač nasadíme kryt, který nám zajistí, že se rozprášené palivo ze vstřikovače nedostane do vzduchu v laboratoři, ale zastaví se o stěny válcového krytu a steče hadičkou do připravené odpadní nádržky.

11) Ventil C přepneme do polohy 1 (tím poteče přebytečné palivo z railu, který je už propláchnutý, do palivové nádrže)

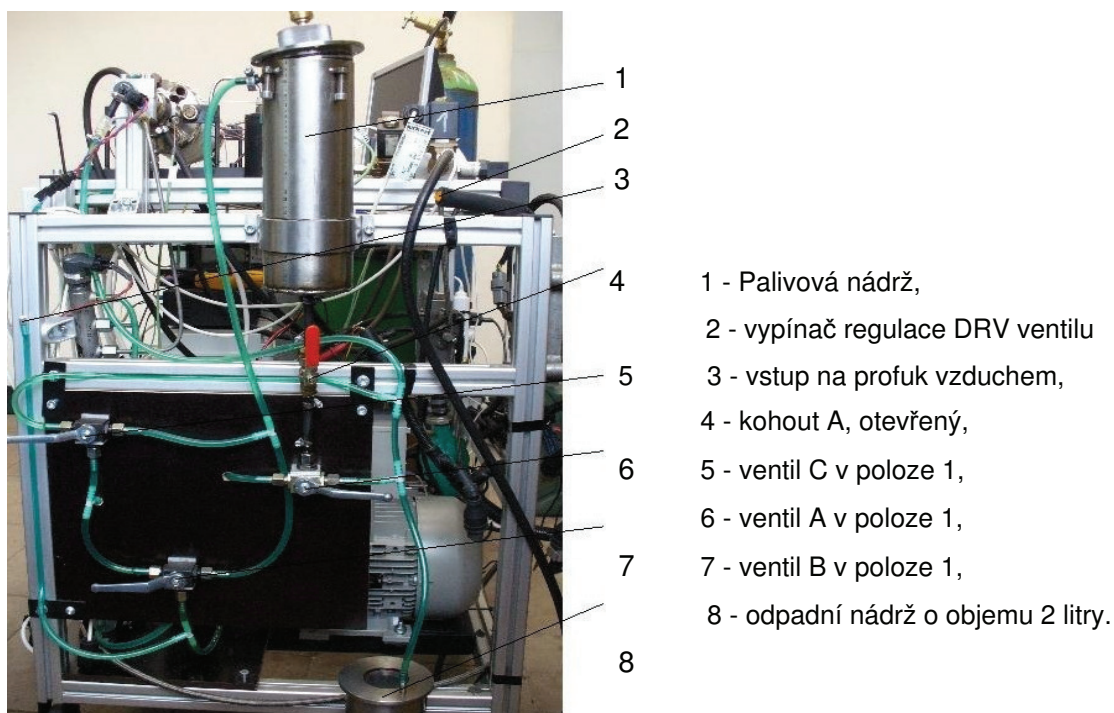
12) Zapneme nejdříve podávací a následně vysokotlaké čerpadlo

13) DRV ventil nastavíme pomocí hrubého a jemného ladění (obr. 3.6, [4]) na

vstřikovací tlak, který by měl být více než 300 bar (na multimetru (obr. 3.6, [6]) nastavíme napětí na DRV ventilu 1V, což nám dá dostatečný tlak 500 bar na proplach vstřikovače)

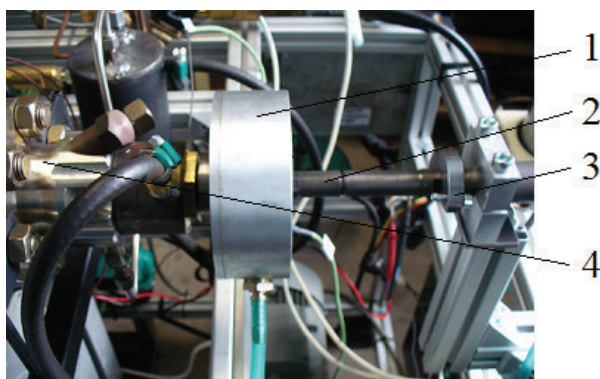
14) Na vstup u vstřikovače (obr. 3.6, [10]) připojíme sekvenční měnič a propláchneme vstřikovač vstřikováním paliva, k proplachu postačí cca 1dl vzorku (odměříme v odpadní nádržce)

15) Po dokončení proplachu vstřikovače z něj odejmeme válcový kryt a pomocí dvou šroubů připevníme zpět k vysokotlaké komoře.



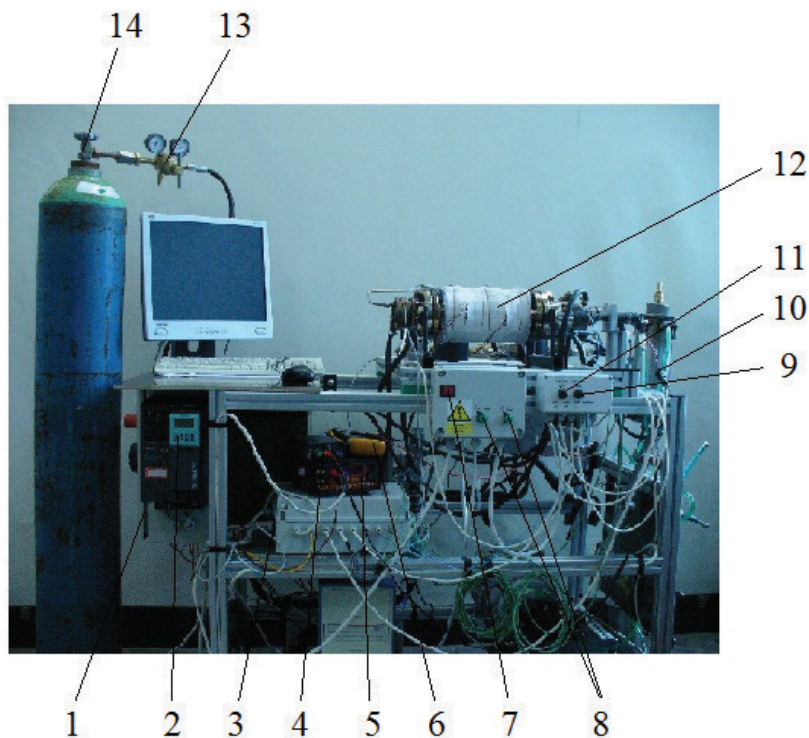
Obr. 3.4 Fotodokumentace zařízení, pohled zprava vůči postoji při ovládání

Příloha 4/Strana 6: Postup měření [3]



- 1 – Kryt vstřikovače,
- 2 – vstřikovač,
- 3 – úchyt s dvěma šrouby M6,
- 4 – vstupní příruba vysokotlaké, komory.

Obr. 3.5 Nasazení krytu vstřikovače při jeho proplachu



Obr. 3.6 Pohled na zařízení z místa ovládání při měření

- 1 - Hlavní panel, vypínač zařízení,
- 2 - vypínač vysokotlakého čerpadla,
- 3 - vypínač řídicí jednotky,
- 4 - regulace napětí na DRV ventilu (hrubé a jemné lazení),
- 5 - vypínač nízkotlakého čerpadla,
- 6 - multimetr,
- 7 - vypínač jednotky topných těles,
- 8 - regulátory topných těles,
- 9 - ovládání vzduchového ventilu V3 na výstupu z komory,
- 10 - výstup na připojení sekvenčního měniče,
- 11 - ovládání ventilů V1 a V2 na vstupu syntetického vzduchu do komory,
- 12 - vysokotlaká komora s topnými tělesy,
- 13 - regulační ventil,
- 14 - kohout láhve se syntetickým vzduchem.

Příloha 4/Strana 7: Postup měření [3]

Po proplachu zařízení můžeme začít s měřením palivového vzorku. Před měřením si ještě potřebujeme spustit a nastavit program měření, připravit tabulku, do které budeme zaznamenávat naměřené hodnoty a spustit další potřebné programy, které nám pomohou k zaznamenávání dat.

3.3 Samotné měření

- 16) Spustíme PC, po spuštění systému spustíme program pro měření na zařízení, nachází se ve složce *Program2010* pod názvem *Mereni_cc*. Pod stejnou složkou se nachází i soubor *TABULKA měřených hodnot*, do které se vyplňují naměřené hodnoty, spustíme jej také.
- 17) Na monitoru je zobrazen spuštěný program, je velice důležité správně nastavit hodnoty v záložce *Nastavení a data* (obr. 3.7). Po nastavení hodnot je potřeba vytvořit složku s vlastním názvem, do které se budou ukládat textové soubory s naměřenými tlaky v závislosti na čase. Po každém měření se textový dokument ukládá do složky *Program 2010* a dalším měřením se tento dokument automaticky přepíše novým. Dále je zapotřebí otevřít vhodný program, do kterého lze vkládat obrázky uložené do paměti PC, doporučuji jednoduchý ale přesto velice užitečný program Malování.

Obr. 3.7 Nastavení hodnot v programu pro měření CČ

Příloha 4/Strana 8: Postup měření [3]

S měřením vzorku můžeme začít tehdy, je-li komora ohřátá na provozní teplotu, která by se měla pohybovat v rozmezí 760-770 °C. Během měření nám bude teplota vysokotlaké komory kolísat. Je zapotřebí dbát na co nejvyšší možnou konstantní hodnotu teploty komory, protože na této teplotě je závislý ohřev vzduchu v komoře. Teplotu můžeme nastavit dvěma regulátory topných těles (obr. 3.6, [8]). Tyto regulátory musí být nastaveny současně na stejnou aktuální polohu a během měření můžeme jejich pootočením upravovat teplotu komory. Teplota komory v závislosti na pootočení regulátorů nereaguje okamžitě, je zde časová prodleva (cca 3min), proto není vhodné při nastavování požadované teploty pootáčet o velkou hodnotu, stačí mírně pootočit a vyčkat na změnu teploty. Pokud budeme otáčet o velký rozdíl, musíme počítat s tím, že nám teplota začne rychleji stoupat či klesat (záleží na směru pootočení) a komora bude mít teplotní setrvačnost, to znamená, že pokud budeme mít teplotu nižší než teplotu požadovanou, tak teplotu pomocí regulátorů výrazně zvýšíme, ta nám vystoupá na požadovanou hodnotu a i přes to, že následně pomocí regulátorů teplotu snížíme, bude stoupat dál, avšak jen určitou dobu, poté začne klesat. Tomuto kolísání teplot je potřeba se vyhnout.

18) Ventily V1 a V2 uzavřeme, ventil V3 musí být otevřený (obr. 3.6, [11] a [9]).

19) Otevřeme kohout na láhvi se syntetickým vzduchem a regulační ventil nastavíme na hodnotu minimálně 28 bar, maximum je 45 bar. Vhodné je nastavit na hodnotu 30 bar.

20) Během několika málo sekund se komora naplní vzduchem, poté uzavřeme ventil V3 a vyčkáme 2 min, až se vzduch ohřeje. Teplota ohřátého vzduchu by se měla pohybovat v hodnotách okolo 520 – 530 °C.

Počet měření jednoho paliva bude celkem 30, mezi jednotlivými měřeními je pauza 2min, která je dána dobou ohřevu syntetického vzduchu v komoře a zároveň je to dostatečná doba pro zapsání a uložení naměřených hodnot. Během měření už nezbyde čas na nic jiného. Je potřeba mít do tohoto okamžiku všechny body uvedené výše splněné.

Těsně před měřením potřebujeme zaznamenat tyto hodnoty:

- Tlak v přívodním potrubí komory
- Skutečnou teplotu vzduchu v komoře
- Skutečnou teplotu stěny komory

Příloha 4/Strana 9: Postup měření [3]

- 19) Zapneme nejdříve podávací čerpadlo, hned poté vysokotlaké čerpadlo a nastavíme vstřikovací tlak na 1000bar tak, že nastavíme napájení DRV ventilu pomocí hrubého a jemného ladění na hodnotu 2,5 V. Kroky 20 – 23 je potřeba provést co nejrychleji za sebou, aby byly hodnoty v okamžiku vstřiku paliva aktuální.
- 20) Otevřeme ventily V1 a V2 na vstupu syntetického vzduchu a statický snímač tlaku zaznamená hodnotu v programu, která se zobrazí na obrazovce monitoru.
- 21) Klávesou *Print Screen* uložíme aktuální zobrazení na monitoru do paměti PC
- 22) Uzavřeme ventily V1 a V2.
- 23) V programu dáme povel ke vstřiku paliva tlačítkem START.

Tím jsme dali povel řídicí jednotce a vstřikovač vstříkne palivo do vysokotlaké komory, kde se následně vznítí. Piezometrický snímač zaznamená průběh tlaku v závislosti na čase a tyto hodnoty uloží do textového souboru, který automaticky uloží do složky *Měření2010*. Nyní máme necelé 2 min, které zbývají do dalšího měření, na záznam dat a provedení následných kroků.

- 24) Vypneme vysokotlaké a následně podávací čerpadlo
- 25) Otevřeme ventily V1 a V2, otevřeme ventil V3 a necháme cca 4 sekundy vyfouknout starý vzduch
- 26) Uzavřeme ventil V3 a necháme vysokotlakou komoru naplnit a natlačovat novým vzduchem (cca 5 s)
- 27) Uzavřeme ventily V1 a V2 a mezi tím, co se v komoře bude ohřívat čerstvý syntetický vzduch, zaznamenáme data.
- 28) V souboru *Program2010* je uložený soubor *text* s naměřenými hodnotami tlaků v závislosti na čase. Tento textový dokument zkopírujeme do své, předem vytvořené složky a vhodně pojmenujeme, doporučuji dokumenty nazývat číslem měření a aktuálním datem zkoušky. Tento krok je velice důležitý, protože při dalším měření se textový soubor automaticky přepíše!
- 29) V programu *Malování* vyvoláme snímek kombinací kláves *Ctrl+V* (snímek aktuálního zobrazení na monitoru těsně před zmáčknutím tlačítka START),
(krok 21)
- 30) Z tohoto snímku opíšeme hodnoty do předem připravené tabulky (*TABULKA měřených hodnot*). Je potřeba upozornit na chybu v programu a to prohození hodnot *skutečné teploty stěny komory* a *skutečné teploty vzduchu v komoře*.

Příloha 4/Strana 10: Postup měření [3]

Nyní máme pár sekund, které nám zbývají do dalšího měření, zhruba 10-15 s před tím, než nám stopky zobrazí od posledního měření 2 min je potřeba začít s dalším měřením, z důvodu aby byl okamžik vstřiku paliva v pravidelných periodách. Dalším měřením začneme znovu od kroku 19) a pokračujeme do kroku 30). Tento sled operací opakujeme dokola. Až budeme mít hotových všech 30 měření, pokračujeme dále krokem 31).

- 31) Po dokončení všech 30 měření vynecháme kroky 25, 26, 27 a uzavřeme regulační ventil na láhvi se syntetickým vzduchem.
- 32) Otevřeme ventily v pořadí V1, V2 a V3 a necháme komoru vyprázdnit.
- 33) Stáhneme regulátory topných těles na nulovou hodnotu a vypneme bílou jednotku topení červeným vypínačem.
- 34) Uzavřeme kohout A.

Všechny naměřená data doporučuji zálohovat na vhodný nosič (Flash Disk) kvůli jejich bezpečnosti hlavně z důvodu dalšího zpracování naměřených dat, kterému bude věnována další kapitola.

- 35) Ukončíme všechny programy a vypneme PC
- 36) Na hlavním panelu vypneme ovládání vysokotlakého čerpadla červeným tlačítkem STOP
- 37) Protože je komora ještě zahřátá na vysokou teplotu a trvá nějaký čas, než se ochladí na bezpečnou teplotu, která je menší než 250 °C, musíme nechat okruh chlazení ještě 20 – 30 min zapnutý a zařízení průběžně kontrolovat. Po uplynulém čase černým vypínačem na hlavním panelu pootočením do polohy 0 vypneme okruh chlazení a elektrický obvod.
- 38) Po měření je potřeba řádně uklidit laboratoř a zbylé palivo ukládat na bezpečných místech a v nádobách pro něj určených.